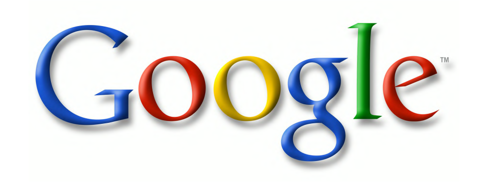
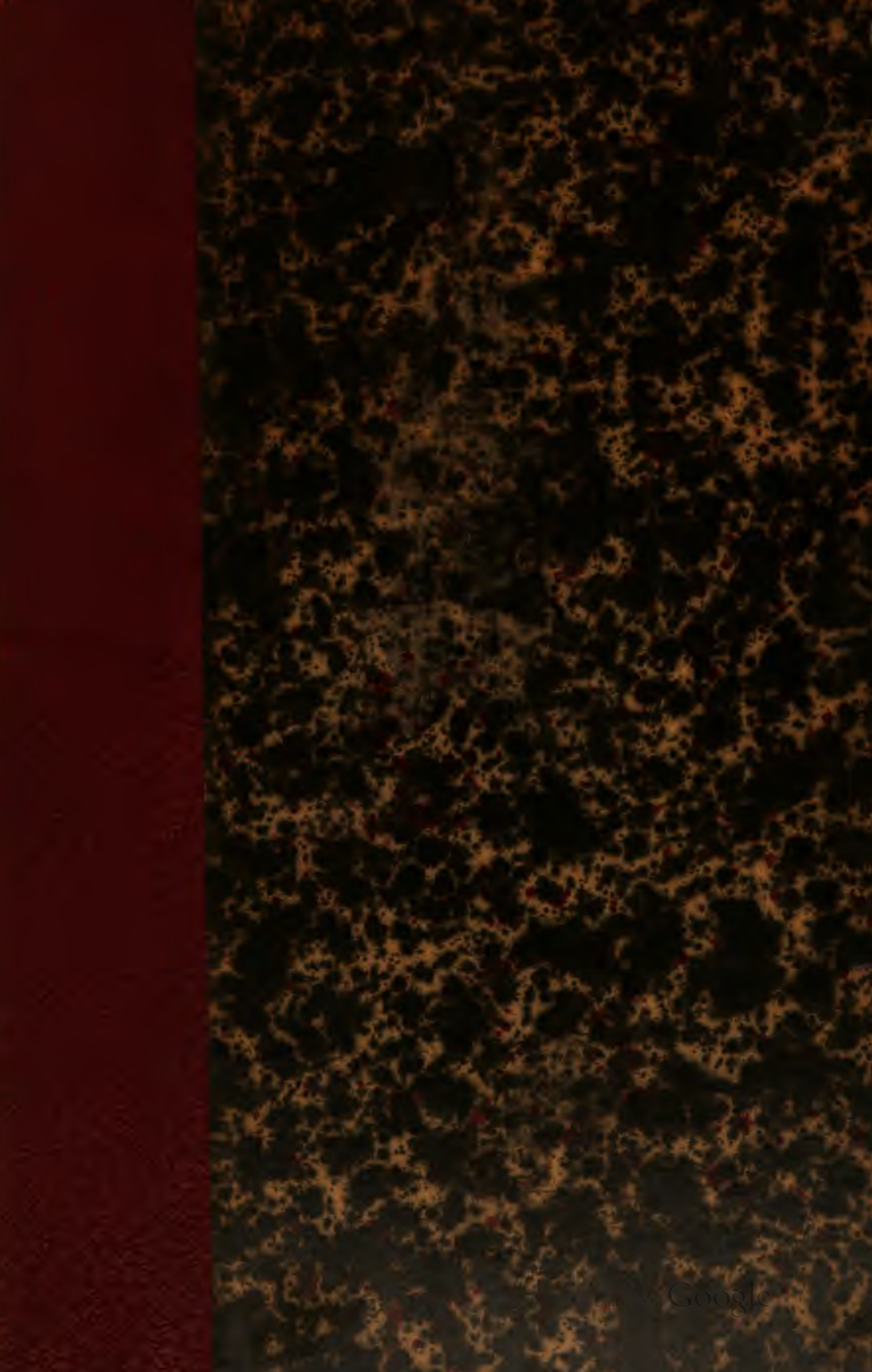





Library
of the
University of Wisconsin



FACULTÉ DES SCIENCES DE GRENOBLE

Electricité

INDUSTRIELLE

3me ANNÉE.

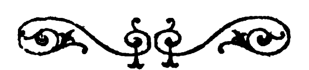
Cours public professé par

M. PAUL JANET,

Docteur ès-sciences, professeur de Physique, chargé du cours d'Electricité industrielle

à la Faculté des Sciences de Grenoble.

Leçons rédigées par M. BUCLON, chef des travaux à l'Ecole Vaucanson.



GRENOBLE

ALEXANDRE GRATIER et Cie, Libraires-Editeurs (Ancienne Librairie Maisonville ;

23, Grande-Rue, 23

1894.

Messieurs,

En inaugurant aujourd'hui la 3e Année du Cours d'Electricité industrielle, je crois devoir renouveler mes remercîments à la Chambre de Commerce, au Conseil Municipal de Grenoble et au Conseil Général de l'Isère, sous les auspices desquels cet enseignement a été placé.

Ce cours, ainsi que je l'annonçais l'année dernière, comprend deux parties : 1° — les conférences ; 2° — les Manipulations de laboratoire. Il ne m'appartient pas de juger les premières mais je dois quelques éclaircissements sur les secondes.

Le Laboratoire, à l'état d'embryon l'année dernière, s'est enrichi successivement et possède ou aura très prochainement :

1° — une dynamo à courants continus, type Gramme supérieur de 100 volts et 30 ampères.

2° — une batterie de 60 accumulateurs de 250 ampère-heures ;

3° — divers appareils de mesure : galvanomètre Thomson, Deprez, d'Arsonval ..., boîtes de résistance, étalons divers, etc.. ;

4° — une salle de photométrie ;

5° — un moteur Brown, d'une puissance de 5 chevaux, branché sur la distribution de la Ville.

Qu'il me soit permis de remercier publiquement ici les généreux donateurs qui ont contribué à la formation de ce Laboratoire - complément indispensable d'un cours d'électricité industrielle - et de faire appel, de nouveau, à la générosité des personnes qui s'intéressent au développement de l'industrie électrique dans notre région.

P. Janet

1ère Leçon

Applications de l'Energie électrique.

Eclairage électrique

Généralités sur l'Eclairage

La lumière électrique a pris, ces dernières années, un développement considérable; on peut dire qu'elle est venue à son heure par suite du besoin de plus en plus intense d'un éclairage artificiel. Il est notoire, en effet, que l'œil humain devient d'autant plus exigeant qu'il est plus satisfait.

Une statistique intéressante, que nous empruntons à M. Mascart, est celle du nombre de bougies qui furent employées à l'éclairage de la Salle des glaces du palais de Versailles, à l'occasion de trois fêtes qui y furent données :

En 1785, on employa 1800 bougies correspondant à un éclairage moyen de 0 bougie 19 par mètre cube.

En 1873 (fêtes à l'occasion de la visite du Schah de Perse) on employa 4000 bougies correspondant

à 0 bougie 43 par m³.

En 1878 (fêtes à l'occasion de l'Exposition universelle) l'éclairage fut doublé soit 8000 bougies correspondant à 0 bougie 85 par mètre cube.

Actuellement, dans les locaux fermés, le chiffre de une demi-bougie par m³ est très souvent dépassé et atteint même dans quelques cas particuliers (théâtres etc...,) jusqu'à 2 bougies pour le même volume.

La lumière électrique devait d'ailleurs obtenir ce développement rapide en raison de diverses qualités:

1° — Au point de vue hygiénique, la lumière électrique ne vicie pas l'air et l'on peut augmenter indéfiniment le nombre de lampes électriques sans que l'air d'une salle ait sa composition altérée du fait de l'éclairage; en outre cet éclairage dégage environ 17 fois moins de calories, à intensité égale, que l'éclairage au gaz (Voir le calcul cours de 1ère Année - page 60).

2° — au point de vue de la douceur, de l'entretien des peintures, des dangers moindres, etc...,

Malgré ces avantages, la lumière électrique est restée, sauf des cas spéciaux, un éclairage de luxe.

Le tableau ci-dessous nous donne le prix comparatif de divers modes d'éclairage et nous-

montre, dans le bec Auer, = d'apparition récente et sur lequel nous reviendrons tout à l'heure = un redoutable concurrent pour l'électricité.

Prix de la lumière fournie par les sources lumineuses usuelles.
(En centimes par carcel-heure)

Bougie	12. „
Lampe modérateur à l'huile	6. „
au pétrole	2.50
Gaz (bec papillon)	6. „
„ (bec Auer)	1.30
Lampes à incandescence	5. „

L'étude économique de la production artificielle de la lumière était très simple autrefois, alors que l'on n'utilisait que la combustion des corps gras (Stearine, huile, etc...,) ou encore celle du gaz d'éclairage. Il suffisait en effet de peser la matière consommée, ou de mesurer le volume de gaz dépensé et d'évaluer l'intensité de la source lumineuse.

Mais aujourd'hui, avec l'emploi de systèmes aussi compliqués délicats et coûteux que le sont les usines centrales, cette étude est devenue très complexe et l'on ne peut se contenter des évaluations grossières de jadis : on ne se borne plus à connaître combien l'on consomme, on veut savoir

comment l'on consomme, et cette exigence est bien jus-tifiée à une époque où la nécessité de l'économie se joint à un besoin croissant de bien être.

Il est donc essentiel, si l'on veut s'occuper d'une façon intelligente des questions multiples qui se rattachent à l'éclairage, d'avoir des notions géné-rales très nettes sur la constitution des corps lumineux et sur la nature de la lumière en général.

L'allumeur de reverbères peut ignorer ce qu'est cette lumière qu'il fait jaillir de sa lampe, mais le fabricant de gaz, l'Ingénieur Electricien doivent connaître les théories modernes afin de juger la lumière qu'ils produisent, d'en analyser les qua-lités et les défauts afin d'en prévoir et d'en réaliser les progrès.

Nous serons en possession d'une telle science lorsque nous aurons réussi à rattacher la lu-mière au principe général de l'énergie.

Il est donc indispensable de se bien pénétrer des idées actuelles que l'on a sur l'énergie et que nous avons étudiées dans le cours de 1ère année.

Nous nous bornerons à rappeler ici quelques définitions :

le Kilogrammètre est l'unité de travail. (Kgm.)

le Joule est une nouvelle unité de travail plus

petite que la précédente, introduite dans l'étude de l'électricité, le joule vaut 0,102 Kgm.

La puissance, qui correspond à un travail effectué dans l'unité de temps, ne doit pas être confondue avec le travail qui n'implique aucune notion de durée.

En mécanique on emploie, comme unité de puissance, le cheval-vapeur correspondant à un travail de 75 Kgm. effectué dans une seconde, ou le Poncelet de 100 Kgm. préconisé dans le dernier congrès de Mécanique.

En électricité, on a introduit comme unité de puissance le Watt correspondant à un travail de un joule en une seconde. On emploie fréquemment l'hectowatt, le kilowatt.

Comment rattacherons-nous l'idée de lumière à ces idées d'énergie, de travail, de puissance qui doivent nous être absolument familières ?

Nous le ferons en énonçant la proposition suivante qui résulte des découvertes les plus récentes dont s'est enrichie la science.

« La lumière est constituée par les mouvements vibratoires très rapides des dernières molécules des corps lumineux »

Ce mouvement vibratoire est extrêmement

rapide ; il a son siège dans les dernières molécules du corps, il échappe à nos sens et nous serons ; là encore, amené à une de ces comparaisons plus palpables dont nous avons fréquemment usé jusqu'ici dans les études électriques.

Nous prendrons un mouvement vibratoire suffi-samment lent pour qu'il soit visible : le mouvement d'un pendule par exemple qui, écarté de sa position de repos, effectue des oscillations dont l'amplitude va en diminuant ; ou mieux encore le mouvement d'un ressort qui, serré dans un étau, vibre sous l'impulsion d'un effort initial.

Comment introduire l'idée d'énergie dans ce mouvement ?

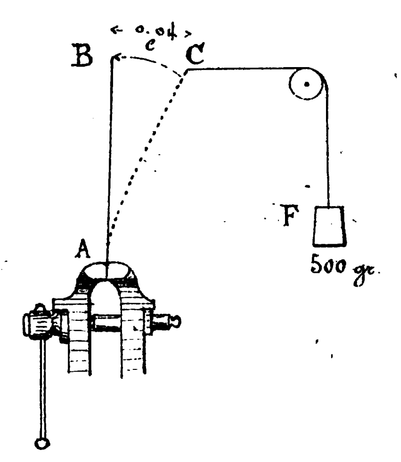
Nous avons, par exemple, déplacé l'extrémité libre du ressort de 4 centimètres de sa position à l'état de repos ; pour cela nous avons dépensé un certain travail. Mesurons la force F nécessaire pour effectuer cet écart e soit 500 grammes ; cet effort part d'un minimum, qui est zéro, pour atteindre un maxi-mum, qui est 500 grammes ; nous pourrons donc admettre un effort moyen de 250 grammes et le travail effectué pour déplacer le ressort de B en C sera

$$\mathfrak{T} = \tfrac{1}{2} Fe$$

ou

$$\mathfrak{T} = 0^{k}.250 \times 0.04 = 0.01 \text{ kgm}.$$

ou en Joules τ = 0,1 joule



Le ressort, amené à la position AC, est abandonné à lui-même ; si nous supposons qu'aucune résistance n'agisse sur lui (dans le vide par Ex.) il effectuera des vibrations qui se continueront indéfiniment.

Il est maintenant devenu le siège d'une certaine énergie intrinsèque que, dans les hypothèques faites, il conservera indéfiniment ; Quelle est la forme et la nature de cet énergie ? Peu importe, il nous est inutile d'approfondir cette question, il nous suffit de savoir que nous avons dépensé une énergie Mécanique de 0,1 joule, que nous l'avons, pour ainsi dire, confiée au ressort et que ce ressort vibrant conservera éternellement intact ce dépôt.

En réalité les choses ne se passent pas aussi simplement. Par suite de la résistance de l'air et des actions moléculaires, les amplitudes diminuent d'abord et le ressort finit par s'arrêter ; s'il a vibré 10" par exemple, il a perdu en moyenne $\frac{1}{100}$ de joule par seconde, soit une

puissance de $\frac{1}{100}$ de watt.

Pour maintenir artificiellement ce mouvement constant, il faudra fournir au système $\frac{1}{100}$ de joule par seconde c'est à dire une puissance de $\frac{1}{100}$ de watt.

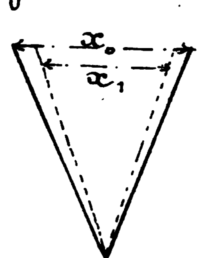
Si nous voulons un peu plus de précision nous ferons le raisonnement suivant :

La force étant proportionnelle à l'écart,

posons $F = ax$

le travail dépensé pour écarter le ressort de sa position d'équilibre aura pour expression $\frac{1}{2} Fx = \frac{1}{2} ax^2$

a étant une constante égale à $\frac{0.500}{0.04} = 12.5$ dans l'exemple précédent. Par conséquent l'énergie intrinsèque d'un ressort vibrant, au moment où l'amplitude de son excursion est x, — a pour valeur $\frac{1}{2} ax^2$. Supposons qu'à un certain moment l'amplitude soit x_0 et que, au bout d'une seconde, elle soit devenue x_1 $(x_1 < x_0)$. Au commencement l'énergie du ressort était :



$$W_0 = \frac{1}{2} a x_0^2$$

à la fin elle est $W_1 = \frac{1}{2} a x_1^2$

La perte d'énergie pendant cette seconde, ou la perte de puissance est donc

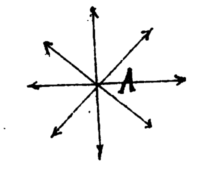
$$W_0 - W_1 = \frac{1}{2} a (x_0^2 - x_1^2)$$

qui peut s'écrire

$$W_0 - W_1 = \frac{1}{2} a (x_0 + x_1)(x_0 - x_1)$$

Que devient cette énergie ?

Supposons le corps vibrant réduit à un point A, absorbant une puissance P pour maintenir les vi-brations ; eh bien, cette puissance



rayonne autour du point, elle se propage tout autour de lui, suivant des lignes droites, comme l'indique la figure. Nous avons, en un mot, un foyer rayonnant d'énergie. Pour matérialiser cette idée nous pouvons assimiler le point A à une très petite sphère, percée sur toute sa surface d'une infinité de trous (infiniment petits), et rece-vant de l'eau sous pression qui s'échapperait dans toutes les directions ; nous pouvons encore l'assimiler aux lignes de force émises par un pôle d'aimant.

Considérons une première sphère de rayon r, ayant son centre en A. La puissance émanée du point A traversera la surface totale $4\pi r^2$ de la

---

Mais $\frac{x_0 + x_1}{2}$ est l'amplitude moyenne X, $x_0 - x_1$ est la perte d'amplitude ΔX par seconde donc :

$$W_0 - W_1 = a X \Delta X$$

sphère, et la puissance qui traversera l'unité de surface sur la sphère sera $p_1 = \frac{P}{4\pi r^2}$.

Sur une deuxième sphère de rayon R et de centre A, la puissance qui traverserait l'unité de surface serait

$$p_2 = \frac{P}{4\pi R^2}$$

d'où

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{R^2}{r^2}$$

qui nous montre que la puissance décroit en sens inverse du carré des distances.

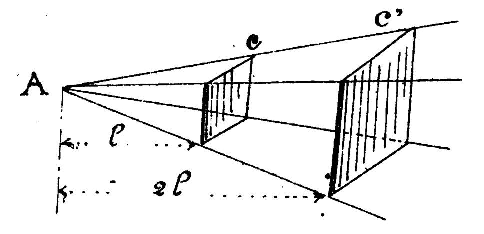
C'est là un principe fondamental en photométrie.(1)

D'une façon générale nous appellerons radiation l'énergie vibratoire rayonnant autour d'un point A, les vibrations pouvant être d'ailleurs lentes ou rapides.

On voit clairement que tout point, émettant tout

---

(1) On le démontre encore de la façon suivante :



Supposons une source lumineuse A de puissance P éclairant un premier carré C placé à une distance l et un second carré C' situé à une distance 2l. Ce carré limité aux plans passant par le point A et les côtés du 1er carré aura évidemment un côté double du premier et une surface quadruple. Les quantités de lumière par unité de surface seront donc dans le rapport de 4 à 1, c'est-à-dire dans le rapport inverse du carré des distances.

autour de lui des radiations, exige, pour être maintenu sans changements dans cet état particulier, qu'on lui communique d'une manière uniforme de l'énergie; en d'autres termes un point radiant absorbe constamment une puissance parfaitement mesurable. Dans l'exemple que nous avons pris d'un ressort vibrant, cette puissance fournie ou absorbée est de la puissance mécanique; mais dans une multitude d'autres cas, que nous examinerons, cette puissance pourra être chimique ou électrique.

Prenons maintenant une source lumineuse ne donnant qu'une seule couleur (monochromatique), la couleur jaune, par exemple, obtenue simplement par l'interposition de sel marin dans la flamme d'un brûleur à gaz. Ce système constitue un mouvement vibratoire identique au précédent mais infiniment plus rapide: au lieu de 20 vibrations par seconde, on en compte 540 trillions. (tableau page 14)

Notre source de lumière jaune est ainsi caractérisée par le nombre de vibrations que chacune de ses molécules effectue en une seconde, de même que tout à l'heure nous pouvions caractériser notre ressort par le nombre de vibrations que chacun de ses points effectuaient dans l'unité de temps. A part l'énorme différence de rapidité, l'assimilation

est complète : des deux côtés nous avons des systèmes dont tous les points ont le même nombre de vibrations par seconde.

Chaque couleur est caractérisée par un nombre de vibrations bien déterminé, plus grand pour le violet que pour le rouge et allant en variant d'une manière continue de l'un à l'autre. Au lieu de caractériser les diverses couleurs par leurs nombre de vibrations N, comme nous venons de le faire, on les caractérise souvent par leurs longueurs d'onde λ.

La longueur d'onde d'une couleur est donnée par la formule simple :

$$\lambda = \frac{3.10^{10}}{N} \text{ centimètres} \quad (1)$$

et correspond à l'espace parcouru pendant une vibration double.

Périodes du mouvement vibratoire lumineux

Couleurs	Nombre de vibrations en trillions par seconde	Longueur d'onde en millièmes de millimètre λ
Violet	704	0.423
Indigo	663	0.449
Bleu	628	0.475
Vert	583	0.512
Jaune	540	0.551
Orangé	511	0.583
Rouge	480	0.620

(1) Le numérateur n'est autre que l'expression de la vitesse de la lumière qui est de 300.000 kilomètres.

Pour entretenir le rayonnement d'énergie nous fournissions tout à l'heure au ressort une puissance de $\frac{1}{100}$ de watt sous forme d'énergie mécanique; pour entretenir les radiations de la source lumineuse, nous fournirons dans le cas de l'exemple précédent, de l'énergie chimique résultant de la combustion du gaz en présence de l'air atmosphérique.

Nous avons pris une source lumineuse très simple, mais en réalité les sources employées sont plus complexes.

Newton a prouvé qu'une source lumineuse blanche rayonne une infinité d'espèces d'énergie caractérisées chacune par un nombre déterminé de vibrations; l'expérience bien connue du spectroscope montre cette décomposition de la lumière.

Les sources de lumière blanche doivent donc en réalité être considérées comme la réunion d'un grand nombre de sources lumineuses correspondant chacune à un nombre déterminé de vibrations. Nous pouvons encore matérialiser cette conception en comparant la lumière blanche à l'ensemble d'un certain nombre de diapasons de vibrations différentes donnant par leur réunion un son complexe (1)

(1) A une couleur simple en optique correspond en acoustique une note simple (diapason) à une couleur composée un son complexe (violon, flûte, etc...)

Quant aux nombres de vibrations, le rouge est assi-
-milable aux notes graves et le violet aux notes aigües.
Ainsi un corps lumineux, le soleil, une lampe, un bec de gaz, par exemple, nous apparaissent comme formés d'une infinité de points radiants (voir plus haut) émettant chacun pour leur propre compte une radiation particulière. Toutes ces radiations rayonnent autour du corps lumineux et se propagent sous forme d'énergie vibratoire à travers tout l'espace. Lorsque cet ensemble confus et compliqué de radiations tombe sur notre organisme, il affecte certains de nos sens; les radiations de périodes relativement lentes dont les longueurs d'onde sont supérieures à 0.76 millièmes de m/m. (1) nous affectent sous forme de chaleur mais sont insensibles à l'œil: elles tombent, il est vrai, sur l'œil, mais celui-ci reste complètement inerte et ne nous transmet aucune sensation. Les radiations de périodes un peu plus rapides, celle dont la longueur d'onde est comprise entre 0.76 et 0,34 microns tombant sur l'œil y font naître la sensation spéciale que nous appelons lumière: lumière rouge pour les grandes longueurs d'onde, violette pour les petites, blanches si toutes les radiations sont mêlées

(1) Ce nombre est le plus élevé en effet de l'échelle donnant la sensibilité de l'œil, pour les différentes couleurs. (tableau page 25)
Le millième de millimètre a reçu le nom de micron.

ensemble précisément dans la proportion où les con-tient l'énergie rayonnante que nous envoie le soleil (1)

Puis si les périodes deviennent plus courtes encore, pour des longueurs d'onde inférieures à 0.34 microns, de nouveau les radiations cessent d'être capables d'ex-citer notre nerf optique et deviennent invisibles. On appelle radiation infra-rouges les radiations invisibles à périodes lentes ; radiations ultra-violettes les radiations invisibles à périodes rapides.

Nous pouvons maintenant nous rendre compte de la manière dont un corps devient lumineux. Prenons, par exemple, un morceau de fer et chauffons-le ; il commence par emettre des radiations infra-rouges invisibles ; la température s'élevant vers 500°, à ces radiations infra-rouges s'ajoutent quelques radia-tions visibles rouges ; puis, à mesure que la tem-pérature monte, l'orchestre des points radiants, si l'on peut s'exprimer ainsi, s'enrichit de vibra-tions de plus en plus rapides et, comme cela doit être

---

(1) Il faut bien remarquer en effet que si, parmi tous les mélanges possibles de couleurs, le blanc joue dans notre vie journalière un rôle tout à fait exceptionnel, c'est simplement parce que le blanc se trouve être la teinte du soleil, centre de notre vie terrestre.

la lumière tourne au blanc (1) ; enfin aux tempé-ratures élevées les radiations invisibles ultra-violettes commencent à prendre naissance.

Nous pouvons maintenant dire ce qu'on entend par incandescence d'un corps.

L'incandescence d'un corps n'est autre que le mouvement vibratoire très rapide dans lequel on maintient ce corps, à l'aide d'une énergie étrangère. Parmi les radiations émises, les seules visibles seront comprises entre deux limites au-delà desquelles le corps restera obscur

Si l'on cesse de fournir cette énergie étrangère, le corps se refroidit, c'est-à-dire que son énergie intrin-sèque se dissipe peu à peu en se transformant en énergie radiante ; c'est un phénomène identique à celui de notre ressort qui s'arrêtait peu à peu de lui-même.

Ainsi, l'arrêt des oscillations d'un pendule qu'on n'entretient pas, l'extinction du son d'une cloche qu'on cesse de frapper, le refroidissement d'un mor-ceau de fer rouge redevenant obscur, voilà une série de phénomènes présentant la plus grande analogie entre eux.

(1) D'où les expressions bien connues de chauffer au rouge naissant, au blanc, etc...,

Quelle est l'énergie que l'on fournit ainsi aux sources lumineuses actuelles, pour les maintenir incandescentes ?

Jusqu'à la lumière électrique la seule énergie fournie ou transformée était l'énergie chimique résultant de la combustion qu'il s'agisse de cire, d'huile, de pétrole, de bois, etc...,

Transformations des energies dans les sources lumineuses

Sources lumineuses anciennes :
Energie chimique ⟶ Energie rayonnante.
Lumière électrique :
Energie électrique ⟶ Energie rayonnante.
Soleil :
Energie mécanique (1) ⟶ Energie rayonnante

La lumière électrique est donc le résultat de la transformation de l'énergie électrique ; le phénomène est d'ailleurs semblable à celui qui se produit dans les sources anciennes. Il importe en effet de remarquer que l'énergie électrique se transforme en chaleur, laquelle peut amener l'incandescence d'un corps. C'est ainsi qu'un fil parcouru par un

(1) Il est très probable en effet que le rayon solaire est dû à une cause mécanique analogue à la compression.

courant s'échauffe, rougit et devient éblouissant de même que s'il était chauffé par une source calorifique quelconque.

Ainsi, dans les lampes à incandescence, comme dans les lampes à arc, on entretient une énergie vibratoire; la lumière des premières, comme celle des dernières, est produite par l'incandescence du charbon.

Le charbon est d'ailleurs le corps qui rayonne dans presque toutes les sources de lumière artificielle. Il se prête tellement bien à cette fonction qu'on n'a guère cherché en dehors de lui. La lampe à gaz ne fait pas exception, une expérience bien simple le prouve. Dans un brûleur Bunsen le charbon est entièrement brûlé: la flamme n'est pas éclairante; si l'on vient à supprimer l'arrivée de l'air, la combustion est incomplète et la flamme devient éclairante.

Parmi les corps - autres que le charbon - dont on a cherché à utiliser l'incandescence on peut citer la chaux et la magnésie (lampe Drummond). Mais c'est surtout l'invention du bec Auer qui montre qu'on peut trouver mieux que le charbon.

Dans ce système, la flamme du gaz est employée à porter à l'incandescence une légère toile

d'un oxyde métallique appelé zircone (1) ; cette incandescence est atteinte à une température probablement moins élevée que pour le charbon et, en tous cas, au lieu d'avoir à porter à l'incandescence des particules de charbon qui se renouvellent sans cesse, comme dans les becs de gaz ordinaires, il suffit de maintenir incandescent un corps, toujours le même, à savoir la toile de zircone. Cette circonstance est évidemment avantageuse et procure une meilleure utilisation de la chaleur (énergie) du foyer; De là le rendement relativement élevé de ces appareils qui, ainsi que nous le disions plus haut, constituent à l'heure actuelle, une concurrence à l'électricité qui est loin d'être négligeable.

La voie du progrès, pour l'éclairage au gaz et probablement pour toutes les sources lumineuses, consiste donc à rechercher l'incandescence des corps autres que le charbon.

Il est intéressant de connaître la puissance dépensée pour la production d'une quantité déterminée de lumière.

---

(1) On sait aujourd'hui qu'outre le zircone, il entre dans le mélange, des oxydes de lanthane, d'Yttrium, de thorium, de cérium, de néodymium.

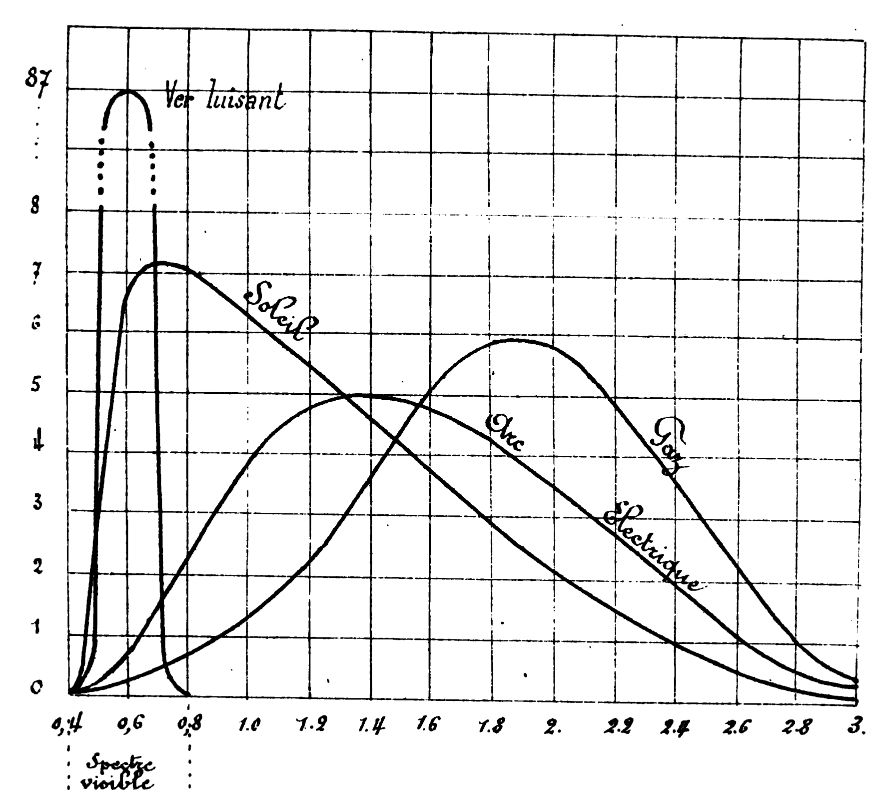
= Puissance dépensée dans les sources lumineuses actuelles =
(En watts par bougie)

Bougie	86.
Lampe à huile	57.
" pétrole	42.8
Bec de gaz papillon	93.2
" Argand	68.8
Brûleur Siemens intensif de 230 bougies	45.6
Lampe incandescence 16 bougies	3.5
Lampe à arc	0.8

Ce tableau montre la supériorité incontestable de la lumière électrique au point de vue du rendement en énergie ; malheureusement le coût actuel de cette énergie intervient en sens contraire et fait de cet éclairage, ainsi que nous le disions plus haut, un éclairage relativement coûteux.

Mais on a été plus loin, poussé par le désir, - signalé en commençant -, de connaître non seulement combien on dépense d'énergie, mais encore comment elle est dépensée, comment elle est répartie.

C'est pour répondre à cette question qu'ont été tracées, par Langley, les courbes figurées ci-dessous (1)



Voici la signification et l'usage de ces courbes: Veut-on connaître la quantité d'énergie rayonnante que possède l'ensemble des radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre λ_1 et λ_2 ? On mesure les ordonnées correspondantes à ces points et la quantité cherchée sera la surface comprise entre ces ordonnées, l'abscisse et la courbe. Les radiations visibles sont tout entières contenues de 0,4 à 0.8,

(1) On consultera avec grand profit à ce sujet les intéressants articles publiés par M. Ch. Ed. Guillaume dans la revue générale des Sciences (1892)

les autres n'ont pas d'effet utile. Ainsi, dans le spectre du soleil, toute la quantité d'énergie située à droite de l'ordonnée 0.8 est perdue au point de vue lumineux. Si l'on mesure les surfaces comprises à droite et à gauche de cette ordonnée on trouve que, sur 100 joules d'énergie envoyés par le soleil, 14 seulement sont utiles sous forme d'énergie lumineuse; le <u>rende-ment photogénique</u> est donc de 14 % seulement. Des courbes analogues nous donnent pour l'arc élec-trique, un rendement de 2,5 % et pour le gaz .... 1.2 %.

Ces 2 derniers chiffres prouvent non seulement que, à ce point de vue, la lumière électrique possède une supériorité marquée sur le gaz puisque son rende-ment photogénique est deux fois plus grand, mais encore que cette supériorité est loin d'être aussi grande que dans le tableau qui donne la dépense en watts par bougie. Il n'y a aucune contradiction entre ces 2 résultats : ils montrent seulement que dans les lampes électriques on utilise très bien l'énergie élec-trique disponible, tandis que dans les lampes à gaz on utilise très mal l'énergie chimique dispo-nible. Il y a donc place pour de très grands progrès dans l'éclairage par le gaz puisque les plus grands défauts de cet éclairage ne tiennent pas à la <u>nature</u> même de la lumière émise, mais à la façon défectueuse

dont s'effectue la combustion. Aussi, des progrès énormes ont-ils déjà été réalisés dans les becs Siemens, les becs intensifs, à récupération, etc...,

Les nombres indiqués ne peuvent pas être considérés comme définitifs, car on n'a pas tenu compte de toutes les circonstances. Ainsi l'œil est beaucoup moins sensible au rouge et au violet qu'au jaune et au vert, en d'autres termes il n'est pas également bien adapté à la perception de toutes les couleurs ; par conséquent, au point de vue de l'éclairage, une même puissance vibratoire dans le rouge ou dans le violet a moins de valeur, est moins élevée en dignité pour ainsi dire, que dans le jaune et le vert ; les rendements précédents doivent donc être abaissés.

Sensibilité de l'œil
pour les différentes couleurs du Spectre.

Longueur d'onde	Couleurs	Sensibilité
0.34	-----------	0.003
0.38	-----------	0.020
0.40	Violet	0.128
0.45	Bleu	2.70
0.50	Vert	7.58
0.55	jaune verdâtre	5.38
0.60	-----------	0.95
0.65	rouge	0.07
0.70	-----------	0.012
0.75	-----------	0.00006
0.76	rouge très sombre	0.00001

Minimum de puissance pour produire une impression sur l'œil dans le vert $\frac{2.8}{10^{16}}$ watts.

Le maximum de sensibilité correspond à la couleur jaune verdâtre. Il est à remarquer que ce maximum de sensibilité de l'œil a lieu à peu près pour les radia-tions qui, dans le spectre solaire, ont le maximum d'énergie (1). Il y a là un remarquable exemple d'adap-tation darwinienne ou de cause finale si l'on veut. La source idéale, au point de vue économique, serait donc une source qui ne donnerait que des rayons de cette couleur. Il est à peine besoin d'ajouter que, au point de vue esthétique, cette source serait loin d'être utilisable car elle ne permettrait aucunement de juger de la couleur des objets. Bien qu'il soit difficile de dire où finit le nécessaire et où commence le superflu, nous avons peine à imaginer une époque où l'on considérera comme du luxe d'avoir des sources lumineuses permettant non seulement d'y voir clair mais encore de distinguer la couleur des choses: cela ressemblerait fort à un progrès rétrograde. La vérité est que, à ce jaune économique, il faudrait joindre le luxe d'un peu de bleu et d'un peu de rouge pour se rapprocher autant que possible du blanc solaire en vue duquel notre œil est construit.

En résumé de grands progrès sont à réaliser si l'on considère que, dans toutes les sources lumineuses, l'énergie est extrêmement mal utilisée; au point de vue économique,

(1) - se rapporter aux Courbes de Langley.

le cas est comparable à celui d'un industriel qui, pour actionner une machine à coudre exigeant quelques Kilogrammètres, devrait mettre en marche un moteur d'une centaine de chevaux.

Ce qui compense cette prodigalité ou ce gaspillage d'énergie, et fait que, même à l'heure actuelle, l'éclairage artificiel n'est pas ruineux, c'est l'extraordinaire sensibilité de l'œil qui permet l'usage de quantités d'énergie extrêmement faibles. Une fraction de watt exprimée par $\frac{2.8}{10^{16}}$, convertie en jaune verdâtre, affectant l'œil lui cause une sensation de lumière appréciable (1).

Mais peut-on espérer la réalisation de ces progrès? Evidemment car des sources lumineuses économiques existent déjà dans la nature : tel est le ver-luisant. Toute l'énergie vibratoire émise par le ver-luisant est utilisée au point de vue lumineux; il y a là, il est vrai, des phénomènes vitaux non encore approfondis....

A cette classe de sources lumineuses se rattachent les phénomènes de phosphorescence. Certaines substances, après avoir été soumises à l'action de la lumière, restent lumineuses, Exemple, le Sulfure de Calcium qui

(1) D'après M. Ch. Ed. Guillaume, la sensibilité de l'œil, dépasse tout ce que l'on saurait imaginer! En transformant entièrement en lumière de la teinte la plus favorable, l'énergie représentée par une petite calorie (gramme-degré) et en envoyant la totalité de cette lumière dans un œil normal, on pourrait l'impressionner pendant plus de cent millions d'années.

peut offrir des teintes variant du rouge au violet, le diamant, le phénomène connu dans les mers tropicales sous le nom de mer de lait, etc...,

Citons encore les phénomènes de fluorescence. Si l'on reçoit de la lumière violette sur du verre coloré à l'urane, on perçoit une lumière verte sans chaleur; si c'était de la lumière diffuse elle serait évidemment violette; le sulfate de quinine donne une fluorescence bleue; les huiles minérales, l'œil de l'homme et de certains animaux (félins) sont fluorescents.

Enfin l'effluve électrique, l'illumination des tubes de Geissler sont encore entourés de mystère. Les belles expériences de Tesla permettent d'espérer de ce côté là.

En terminant cette Leçon, remarquons qu'elle n'a été en somme que le procès des sources lumineuses actuelles, y compris la lumière électrique. Mais ne les condamnons pas sans retour : en dépit de leurs imperfections, elles ont droit aux circonstances atténuantes car les sources actuelles de lumière réalisent un progrès considérable sur les anciens procédés d'éclairage.

C'est pourquoi nous étudierons la lumière électrique avec les développements qu'elle comporte.

2e Leçon

Lumière Electrique.

Il existe deux modes de production de lumière au moyen de l'énergie électrique :

1°. – Par l'utilisation de l'arc voltaïque.

2°. – Par l'emploi de lampes à incandescence.

Ces deux modes sont bien différents si l'on considère les appareils employés mais, ainsi que nous l'avons dit dans la précédente leçon, ils reposent sur le même principe : utilisation des radiations lumineuses du charbon porté à l'incandescence.

Arc voltaïque

Vers 1808, le célèbre chimiste anglais Humphry-Davy fit l'expérience suivante :

Ayant pris deux baguettes de charbon taillées en pointe, il les plaça dans le circuit d'une pile Volta de 2000 éléments. Il observa que les charbons amenés au contact rougissaient sur une certaine

longueur (fait dû à la résistance présentée par un contact imparfait) mais qu'en les écartant progressivement il se produisait une flamme légèrement arquée. Cette forme en arc provenait de l'action du courant d'air ascensionnel sur la flamme produite entre les charbons placés horizontalement. Davy donna à cette flamme le nom d'arc voltaïque qu'elle a conservé depuis.

La force électromotrice employée par Davy correspondait à environ 2000 volts ; aujourd'hui on emploie des forces électromotrices beaucoup plus faibles (30 à 60 volts). Avec la première, la longueur de l'arc peut atteindre 10 cm, avec les secondes elle ne dépasse pas 10 m/m ; cette longueur a été reconnue suffisante dans la pratique.

Etudions la constitution intime de cet arc et supposons qu'on emploie un courant continu, nous n'aurons pas de peine à comprendre ensuite ce qui se passe avec un courant alternatif.

Dans une lampe à arc, en outre du mécanisme régulateur que nous étudierons à part, on distingue 3 parties :

1° — le charbon positif.

2° — l'arc.

3° — le charbon négatif.

1° — Nous observerons que le premier charbon, celui qui est en relation avec le pôle positif, est très brillant ; c'est lui qui fournit la plus grande partie de la lumière produite. De plus le charbon positif présente une particularité extrêmement remarquable : c'est que son éclat (1) est le même quelle que soit la valeur du courant employé. Cette constance est telle qu'on a même proposé de prendre comme étalon de lumière la quantité de lumière émise par un centimètre carré pris dans la région la plus brillante du charbon positif.

Or, le degré d'incandescence dépend évidemment de la température ; on est donc amené à conclure que la température du charbon positif doit elle-même être constante.

Ce fait a d'ailleurs été confirmé à la suite d'expériences faites par M. Violle et dont voici le principe :

La température d'un corps peut-être déterminée par l'évaluation du nombre de degrés qu'il communique à un poids déterminé d'eau, en se plaçant dans des conditions telles que la chaleur perdue par rayonnement soit négligeable.

Si donc on détache un fragment incandescent du pôle positif et qu'on l'introduise dans un volume

---

(1) Nous décrirons plus tard et avec un peu plus de précision ce qu'on entend par le mot éclat.

déterminé d'eau, dont on mesure la température avant et après l'opération, on constate que l'élévation de température est simplement proportionnelle au poids du fragment de charbon et indépendante du courant employé; cela prouve bien que pour tous les courants la température du charbon positif est la même.

On a essayé d'interprêter ce résultat et l'on a été amené à conclure que cette température constante du charbon positif n'est pas autre chose que la température de vaporisation du carbone laquelle doit présenter une constance analogue aux températures de vaporisation, de congélation de l'eau.

Quelle est la température de ce charbon?

On conçoit qu'il y ait quelques différences dans les évaluations diverses qui ont été faites, et que là on retrouve l'incertitude qui préside toujours à des mesures de température aussi élevées.

Quelques expérimenteurs, parmi lesquels il convient de nommer M. Rossetti, l'ont fixée à 4000°, mais des expériences récentes de M. Violle ont donné 3000°. Il est donc probable que la température du charbon positif est comprise entre 3 et 4000°.

2° — Examinons maintenant l'arc lui-même. Il est très vraisemblablement constitué par de la vapeur de carbone maintenue incandescente par la haute température qui règne dans cette région. Nous remar-

-quons que cette partie n'a que peu d'éclat; nous savons en effet que les corps solides donnent seuls de la lumière rayonnante (l'expérience du brûleur Bunsen en est la confirmation), mais il est certain que la tempé-rature de l'arc est plus élevée que celle du charbon positif.

D'après les expériences de M. Rossetti, cette tempéra-ture serait d'environ 4800°. Si, d'après M. Violle, nous abaissons de 4000 à 3000° la température du charbon positif, il conviendra de faire ici une réduction propor-tionnelle c'est-à-dire d'abaisser de 4800 à 3600° la température de l'arc.

Quoi qu'il en soit, l'arc est la partie la plus chaude du système lumineux; c'est la région à utiliser pour produire des températures élevées (1). Nous laisserons de côté la question chaleur pour étudier la question lumière.

En troisième lieu considérons le charbon (—); il constitue la partie la moins intéressante, on peut dire qu'il est, en quelque sorte, un accessoire obligé mais peu utile; il est en effet moins éclatant, moins chaud,

(1) Les propriétés calorifiques de l'arc ont été utilisées pour produire la fusion de l'acier (Creuset Siemens), pour pratiquer la soudure autogène des métaux (procédé Bernados) et enfin pour rechercher la produc-tion artificielle du diamant par M. Moissan.

et n'est incandescent que sur une faible longueur ; sa température a été trouvée de 3000° par Rossetti, nous l'abaisserons à 2200° pour les raisons données plus haut.

L'examen attentif de ces trois parties nous montre en résumé qu'elles ont des pouvoirs éclairants bien différents

Des expériences photométriques ont appris que la lumière totale émise doit être attribuée :

5 p. % au charbon négatif
10 p. % à l'arc lui-même
et 85 p. % au charbon +

C'est donc ce dernier qui éclaire en réalité ; dire qu'on s'éclaire avec l'arc voltaïque est donc une expression qui manque d'exactitude.

Les considérations qui précèdent sont confirmées par l'examen spectral de la lumière de l'arc projetée sur un écran (expérience faite au cours).

Séparons le spectre du charbon + de celui de l'arc : Le spectre est continu, il commence au rouge pour finir au violet ; remarquons que le rouge et le jaune sont prépondérants, les dernières couleurs du spectre ont une intensité relativement faible : c'est donc à tort que l'on dit que la lumière électrique est violette, elle est en réalité jaune-rougeâtre. Cette apparen

violacée résulte probablement de diverses circonstances dans laquelle se trouve placée la rétine, dont nous parlerons plus loin.

Le spectre de l'arc présente un caractère particulier; il est discontinu comme celui des spectres gazeux ce qui confirme ce que nous avons dit plus haut sur sa constitution.

Quant au charbon — il donne le même spectre que le charbon + mais très atténué ainsi qu'il fallait s'y attendre.

Si nous examinons maintenant la forme du charbon nous constaterons qu'elle n'est pas la même pour le + et pour le —.

Quelle que soit leur forme au début, les charbons se taillent pendant le fonctionnement. Le positif prend l'aspect d'un cône terminé par une surface légèrement concave, tandis que le négatif prend la forme d'une pointe émoussée. De plus, nous constatons un transport de matière dans le sens du courant. Si l'arc, est produit dans l'air les deux charbons s'usent rapidement tous deux, dans des proportions inégales, par suite de la combustion qui se produit; mais si l'on opère dans le vide, la combustion ne peut avoir lieu et l'on voit la pointe positive diminuer et se creuser en <u>cratère</u>, tandis que la pointe négative

s'allonge et augmente de poids. On peut dire qu'il y a distillation de carbone du charbon positif au charbon négatif.

Par suite de ce transport de particules de carbone, les deux charbons, dans l'air, s'usent inégalement : l'expérience prouve en effet que le charbon positif a une usure environ 2 fois plus grande que le négatif. C'est ce qui explique l'habitude que l'on a de placer au pôle positif des charbons de section deux fois plus grande qu'au pôle négatif.

Le cratère du charbon positif constitue la partie la plus éclairante du système. Cette remarque est très importante au point de vue de la distribution de la lumière ; elle indique la nécessité de placer le charbon positif à la partie supérieure afin d'utiliser le pouvoir réflecteur du cratère. Il y a lieu de remarquer que le charbon inférieur produit une ombre portée, qui correspond à une certaine quantité de lumière perdue, cette remarque vient encore justifier l'emploi de charbons négatifs d'un diamètre plus petit que le positif.

Une expérience, facile à réaliser, montre bien la différence des pouvoirs éclairants des deux

charbons . Si, sur une des parois d'une lanterne à projections, on place une feuille de carton munie de deux ouvertures circulaires bouchées par du papier huilé, on constate que ces deux surfaces sont inégale-ment éclairées ; celle qui correspond au charbon + l'est beaucoup plus que l'autre.[1] (L'expérience a été faite au cours et la différence d'éclat des deux charbons montrée en projection).

Jusqu'ici nous n'avons considéré que l'éclairage obtenu au moyen de courants continus ; voyons ce qui se passera avec l'emploi de courants alter-natifs.

Tout d'abord il est à prévoir — et l'expérience le confirme — que les 2 charbons ne présenteront plus le même aspect que précédemment. Il n'y a plus dyssimétrie, les charbons s'usent également et sont également éclairants ; mais, en même temps, on perd l'avantage du cratère au point de vue du rendement lumineux.

---

(1) Il y a lieu de remarquer, dans l'expérience directe, que c'est en réa-lité le disque en regard du négatif qui est le plus lumineux mais cela n'est qu'apparent car ce disque est bien éclairé par le + par suite du pouvoir réflecteur du cratère.

L'éclairage par courants alternatifs présente donc, à ce point de vue, une infériorité sur l'éclairage par courants continus.

En réalité l'usure n'est parfaitement égale que si les charbons sont placés horizontalement ; quand ils sont verticaux le positif s'use encore plus que le négatif dans le rapport de 108 à 100 environ.

Remarquons encore que l'éclairage obtenu par courants alternatifs, produit un bruit particulier à l'unisson de celui de la machine. L'arc fait entendre souvent un bruit particulier appelé sifflement de l'arc qui résulte habituellement d'une variation de la différence de potentiel.

En résumé l'éclairage à l'arc est obtenu par l'incandescence du charbon tout aussi bien que dans la lumière par incandescence ; mais dans le premier, où l'on consent d'avance à la destruction du charbon, on produit une température bien plus élevée que dans la seconde, par suite l'incandescence est poussée bien plus loin, ce qui correspond à un rendement lumineux plus grand.

Nous avons dit précédemment que la lumière électrique était riche en rayons rouges et jaunes mais pauvre relativement en rayons violets. D'où vient

donc cette illusion d'optique qui nous fait paraître d'un bleu violacé ?

Une explication curieuse et ingénieuse de ce phénomène est la suivante :

On admet, dans certaines théories de la vision, que l'organe visuel contient des éléments rétiniens divers ; les uns sensibles au jaune, les autres au rouge, les derniers au bleu et au violet. A la lumière solaire, tous travaillent à peu près également. Lorsque la nuit est venue la vue se repose ; mais ce repos est particulièrement grand pour les éléments rétiniens sensibles au bleu ; ceux qui sont sensibles au jaune et au rouge travaillent encore car nos lumières artificielles sont toutes riches en rayons rouges et jaunes.

Or, lorsqu'un organe se repose il devient plus sensible, plus excitable ; à la lumière électrique ces éléments sensibles au bleu sont donc relativement plus affectés que ceux sensibles au rouge et nous font croire à la prédominance des rayons violacés dans la lumière électrique.

En réalité, quand on compare la lumière électrique au soleil on constate qu'elle est jaune par rapport à lui, mais qu'elle s'en rapproche plus que les autres sources artificielles. Cette circonstance

est très favorable pour l'appréciation des couleurs : une lumière tirant sur le bleu serait mauvaise à ce point de vue et ne permettrait pas d'assortir des étoffes, etc...,

Cette analogie avec la lumière solaire a permis d'employer la lumière électrique à la reproduction de photographies, de dessins par les procédés hélio-graphiques, etc...,

Lorsqu'on produit un arc entre deux charbons, il existe entre eux une différence de potentiel e entretenant un courant d'intensité i. La puissance dépensée

$$ei \text{ watts ou joules par seconde}$$

se retrouve sous forme de chaleur.

Dans les foyers usuels e varie de 30 à 60 volts selon la longueur de l'arc.

L'arc présente donc une résistance apparente de $\frac{e}{i}$ ohms. Cette résistance est-elle une résistance ordinaire ? Si cela était elle devrait diminuer et tendre vers zéro, à mesure que l'arc diminue; or, lorsqu'on considère, entre deux charbons, un arc de plus en plus court, on constate que la force électromotrice ne diminue pas indéfiniment mais qu'elle est toujours comprise entre 30 et 40 volts. Nous ne sommes donc pas en présence d'une résistance

ordinaire. Il faut admettre qu'il existe une force électromotrice inverse analogue à la force électromotrice de polarisation que l'on constate, par exemple, dans un voltamètre ou dans un accumulateur. Dans ce dernier cas, si l'on rapproche les plaques de l'accumulateur, la différence de potentiel entre ces plaques ne s'annule pas.

Nous avons mesuré en bloc la différence de potentiel entre deux charbons, nous pouvons aller plus loin et rechercher avec plus d'exactitude comment se décompose cette différence de potentiel. Au moyen d'une baguette de charbon, introduite au milieu de l'arc, on peut à l'aide d'un voltmètre, mesurer la différence de potentiel: 1°— entre le charbon positif et l'arc; 2°— entre l'arc et le charbon négatif. On trouve ainsi que la première est beaucoup plus grande que la seconde; cela concorde bien avec ce que nous avons trouvé plus haut, à savoir que la plus grande quantité d'énergie se dégage à la surface du charbon positif. (1)

---

(1) Dans les expériences de cours les indications du voltmètre sont habituellement remplacées par l'allumage de lampes à incandescence en tension. Ces lampes

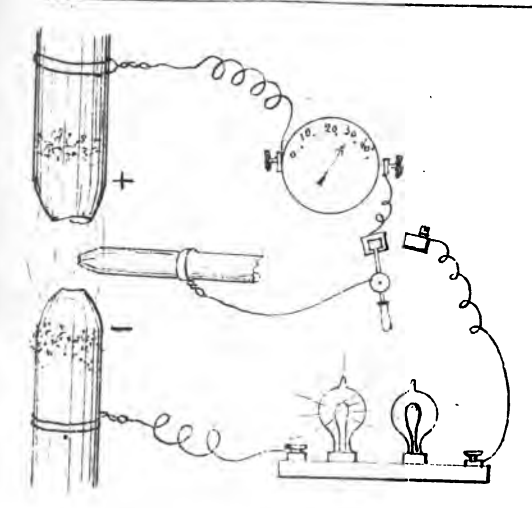
Appelons e la différence de potentiel aux charbons, E la force électromotrice inverse que nous supposons exister dans l'arc ; on a (cours de 1ère année)

$$e = E + RI$$

R étant cette fois la résistance réelle de l'arc.

1°. — Étude de E. Les différentes mesures faites sur la force électromotrice inverse de l'arc (limite vers laquelle tend la différence de potentiel entre les charbons lorsque la distance de ces charbons tend vers zéro) ont appris que E avait une valeur peu variable et comprise entre 30 et 40 volts suivant le cas.

2°. — Étude de R. Nous diviserons cette étude en deux parties : 1° = Laissons d'abord la longueur de l'arc constante et faisons varier, au moyen d'un rhéostat, l'intensité du courant qui le produit. Nous trouvons que R diminue lorsque l'intensité augmente.



peuvent être mises en circuit en nombre variable, jusqu'à ce qu'on ait un éclat normal ; connaissant le voltage des lampes et leur nombre on a une indication de la différence de potentiel entre les deux points considérés. Ces indications qui n'ont pas de prétention à l'exactitude, ont le mérite d'être visibles pour tous les auditeurs.

Voici quelques résultats d'expériences (Preece)

pour $i = 10$ ampères $R = 2.77$ ohms

$i = 21{,}5$ A $R = 1.07$ "

$i = 30.12$ A $R = 0.54$ "

2° — Maintenons l'intensité constante et faisons varier la longueur de l'arc ; nous trouvons que la résistance R croît à peu près proportionnellement à cette longueur ; en sorte que, dans ce cas, on a :

$$e = E + bl$$

l étant exprimé en millimètres, la quantité b varie de 1.4 à 2.8 suivant l'intensité du courant. Il résulte de là, ainsi que nous l'avons déjà remarqué en commençant, que la différence de potentiel aux charbons croît avec la longueur de l'arc.

Il est assez facile de s'expliquer pourquoi R diminue lorsque l'intensité augmente : on observe en effet, dans ce cas, que l'arc devient plus gros, que sa section augmente et, par suite, que sa résistance diminue. Quant à l'augmentation de R avec la longueur, elle n'a rien de surprenant.

On ne manquera pas de remarquer combien est relativement faible la résistance propre de l'arc (2 ohms environ). La quantité de puissance qui y apparaît RI^2 est donc seulement une fraction de la

puissance totale dépensée dans la lampe; comment se fait-il néanmoins, ainsi que nous l'avons remarqué que ce soit l'arc qui possède la température la plus élevée ? Cela tient à ce que les vapeurs de carbone, ayant un faible pouvoir émissif, perdent peu d'énergie par rayonnement, même à une très haute température.

Nous avons vu que l'éclat de la partie la plus lumineuse du charbon positif est toujours le même (c'est l'éclat du charbon porté à une température telle qu'il commence à se vaporiser). Il en résulte que, si l'on fait abstraction de la lumière fournie par l'arc et par le charbon négatif, la quantité totale de lumière recueillie sera simplement proportionnelle à la surface incandescente du charbon positif: Or, la section de l'arc augmentant lorsque l'intensité augmente, la surface incandescente du charbon positif augmente dans les mêmes circonstances et c'est là la vraie raison de l'augmentation de l'intensité lumineuse avec l'intensité du courant; il y a là une différence essentielle entre les lampes à arc et les lampes à incandescence.

Dans ces dernières la surface incandescente

reste toujours la même et le degré d'incandescence croit rapidement avec l'intensité du courant; au contraire, dans les lampes à arc, le degré d'in-candescence de la partie utile reste toujours le même, c'est là surface qui augmente avec l'intensité du courant.

Si l'on admet que cette surface croit propor-tionnellement à l'intensité, il s'en suit que la quantité de lumière croit aussi proportionnel-lement à l'intensité; mais si l'on se reporte aux nombres de Preece qui donnent la variation de la résistance avec l'intensité et si, comme nous l'avons fait, on attribue ces variations de résis-tance aux variations de la section, on en conclut que la section croit plus vite que l'intensité et on est amené à essayer une formule telle que

$$S = mI + nI^2$$

et par suite pour l'intensité lumineuse une expres-sion de même forme.

Cela concorde bien avec une formule donnée par M. Pallaz. Cet ingénieur distingué a en effet indiqué la formule pratique suivante qui est très suffisam-ment approchée pour les calculs journaliers :

Intensité maxima en carcels = $20\,I + 0.4\,I^2$

l'intensité I étant exprimée en ampères.

Jusqu'ici nous n'avons tenté aucune explication de l'existence de cette force électromotrice inverse que nous avons reconnue dans l'arc et, à vrai dire, la question ne présente au point de vue pratique qu'un intérêt secondaire ; néanmoins sans avoir la prétention de donner une théorie absolument rigoureuse de ce phénomène encore bien obscur, il est utile de se faire une idée de sa cause probable.

Un fait bien établi c'est que nous avons dans l'arc la succession de substances suivantes :

Charbon + | Vapeur de charbon (arc) | Charbon −

température élevée — température basse

On peut s'empêcher de comparer ce système au suivant :

Zinc | Cuivre | Zinc

température élevée — température basse

Or ce dernier système présente une propriété remarquable et bien connue, c'est d'être le siège d'une force électromotrice dirigée dans le

sens de cette flèche

(force électromotr. thermo-électrique).

Il est vraisemblable d'attribuer à une cause de ce genre la force électromotrice de l'arc. Il est vrai que les forces thermo-électriques entre métaux sont toujours très faibles tandis que dans l'arc la force électromotrice atteint 30 à 40 volts ; mais n'est-il pas possible d'admettre que deux corps aussi dissemblables qu'un métal solide aux températures ordinaires et de la vapeur de carbone aux plus hautes températures que nous connaissons, présentent aussi des différences de degrés très considérables dans les mêmes propriétés ; cela est rendu d'ailleurs encore plus vraisemblable par la remarque suivante : tandis que dans une soudure métallique un courant n'accomplit aucun travail visible, dans le contact (charbon + arc) il accomplit un travail considérable (vaporisation du carbone d'où une force électromotrice inverse - (Voir le cours de 1ère année).

Cette conception de l'origine thermo-électrique de la force électromotrice de l'arc a l'avantage

d'expliquer pourquoi cette force électro-motrice diminue lorsque l'intensité du courant augmente; cela tient à ce que la température du charbon positif restant constante, celle du charbon négatif monte d'où il résulte, entre les charbons, une différence de température et par suite une différence de potentiel plus faible.

Nous n'avons pas la prétention de donner cette explication comme définitive et nous devons dire que de nombreuses objections peuvent lui être faites; leur discussion nous entraînerait trop loin.

Charbons employés dans l'arc électrique.

Davy employait dans ses expériences des baguettes de charbon de bois qui brûlaient très régulièrement mais aussi très rapidement. Foucault employa le premier le charbon de cornue (résidu de la distillation de la houille dans les cornues d'usines à gaz). Le résultat fut meilleur mais ce charbon présentait encore de graves inconvénients: dureté très grande et difficulté de préparation, homogénéité très faible, variations dans l'éclat de l'arc par suite de la présence de matières étrangères.

On emploie actuellement des charbons artificiels. Les premiers essais dus à M. Jacquelin avaient pour

but de produire du charbon de cornue, par une fabri-cation spéciale qui le débarrassait des impuretés que contient ordinairement le charbon d'usine à gaz ; ces crayons ont donné de bons résultats mais le prix de revient en était très élevé.

M.M. Carré et Gaudrin emploient un procédé qui est l'objet d'exploitations importantes. Ils forment un mélange intime de matières carbonisées puis à l'aide d'un agglomérant ils le transforment en une pâte qui, comprimée et passée à la filière, donne des baguettes cylindriques. Ces baguettes sont desséchées à une haute température qui a pour but d'éliminer les composés volatils.

M. Carré emploie pour la composition de la pâte un mélange de coke très pur, de noir de fumée, graphite ou plombagine, l'agglomérant est un sirop de sucre mélangé à de la gomme qui se transforme en carbone par la cuisson.

Les charbons obtenus après une première cuisson ne sont pas immédiatement utilisables : ils sont trop poreux. On leur fait subir une opération appe-lée nourrissage qui consiste à les immerger pendant un certain temps dans un sirop de sucre, puis à les soumettre à une nouvelle cuisson.

Cette opération longue et coûteuse a pu être

supprimée par l'emploi de brai ou goudron rendu fluide. Voici par exemple, le procédé employé à la Compagnie française de charbons pour l'électricité (1) La matière employée est uniquement le graphite extrê-mement dur que l'on trouve dans les cornues à gaz; ce graphite, soigneusement trié et débarrassé à la main de toutes ses impuretés, est concassé puis passé sous une meule qui le réduit en poudre et enfin sous un laminoir en acier qui le réduit en poussière im-palpable; il est aussi important que difficile d'éviter dans cette poussière la présence de grains extrême-ment fins d'acier, arrachés aux meules et qui nuisent beaucoup à la qualité de la lumière; quel-ques essais de purification au moyen d'un puis-sant électro-aimant (trieuses électromagnétiques) ont donné de bons résultats. Un goudron épais est alors incorporé au graphite et la matière est comprimée au moyen de pierres hydrauliques à travers les trous d'une filière, puis coupés à la longr. voulue (80 c/m); on les porte ensuite dans un four

(1) - Nous devons à l'obligeance de M. Getting, directeur de la Compagnie française de charbons pour l'électricité, d'avoir pu mettre sous les yeux de nos auditeurs, de très intéressants échantillons de charbon, à toutes les phases de la fabrication, depuis l'état de graphite jusqu'à l'état de crayon prêt à être livré.

continu (four Hoffmann) où ils sont lentement portés à une température élevée ; la cuisson dure de 12 à 15 jours.

Pour assurer le centrage de l'arc et afin d'augmenter sa fixité, on emploie fréquemment des charbons dits à âme. Le charbon est passé à une filière spéciale qui laisse un trou central que l'on remplit d'une substance plus conductrice qui constitue l'âme. Ces crayons s'emploient exclusivement au pôle + et donnent de bons résultats, mais ils sont d'un prix relativement élevé.

On emploie aussi des crayons cuivrés par galvanoplastie ; cette opération augmente la durée et diminue leur résistance. Toutefois la lumière produite a une couleur désagréable et changeante ; aussi leur emploi s'est-il peu répandu en France ; par contre l'emploi de ce charbon est assez généralisé en Amérique surtout pour l'éclairage extérieur.

On a également essayé le nickelage des crayons ; ce procédé a les mêmes inconvénients que le cuivrage, au point de vue de la qualité de la lumière, mais il donnerait au point de vue économique, des résultats plus favorables.

On estime que le nickel prolonge d'environ 50 % et le cuivre d'environ 30 % la durée des charbons.

M. M. Rouart frères fabriquent depuis quelques

temps des charbons émaillés qui présentent une économie sur les charbons ordinaires.

Renseignements pratiques

L'expérience prouve qu'il est mauvais, au point de vue de l'utilisation de l'énergie électrique, d'employer des charbons trop gros. Chaque charbon crée, en effet, par rapport à l'autre, un cône d'ombre dont l'étendue augmente avec le diamètre; de plus le charbon négatif se taille en cône d'autant plus allongé qu'il est plus mince, ce qui donne encore une diminution du cône d'ombre; mais il y a cependant une limite car un diamètre très faible entraîne une usure très rapide.

La f. e. m. a employer est en moyenne de 55 volts absorbée ainsi qu'il suit:

Pour vaincre la force contre-électromotrice de l'arc ...	40 volts
Résistance de l'arc	2 –
– des charbons	3 –
– du système de réglage y compris le rhéostat	10 –
	55 –

Les diamètres de charbon les plus habituellement employés sont:

2 m/m pour courant de 2 à 3 ampères correspondant a une longr d'arc de ...
4 – id – 3 à 4 – id – 1 m/m 5

5 m/m pour courant de	4 à 6 ampères	correspondant à une long.r d'arc	2 m/m ..
7 — id —	7 à 10	— id —	2.5
9 — id —	10 à 11	— id —	3 ..
10 — id —	11 à 15	— id —	.....
11 — id —	12 à 16	— id —	4. ..
12 — id —	13 à 20	— id —	4.5
14 — id —	16 à 25	— id —	....
15 — id —	25 à 30	— id —	5 ..
18 — id —	35 à 60	— id —	7 ..
20 — id —	40 à 80	— id —	9 à 10
25 — id —	50 à 120	— id —	.....
30 — id —	80 à 180	— id —	.....

La résistance des crayons est donnée dans le tableau ci-dessous.

Résistance des crayons cylindriques par mètre courant.

Diamètre en millimètres	Résistance en Ohms
1	50.000
2	12.500
3	5.550
4	3.125
5	2.000
6	1.390
8	0.781
10	0.500
12	0.348

15	0.222
18	0.154
20	0.125

A l'inverse des conducteurs métalliques, la résistance des charbons diminue avec la température. La résistance à t° est liée à la résistance à 0 par la relation

$$R_t = R_o\,(1 - at)$$

a coefficient = 0.00052.

t température en degrés.

Appareils d'éclairage utilisant l'arc électrique.

Par suite de la combustion, l'écartement des charbons augmente et l'arc finit par s'éteindre.

Pour utiliser la propriété de l'arc à l'éclairage, on conçoit qu'il soit nécessaire d'employer un système de réglage maintenant l'écart constant. Il existe 2 classes d'appareils remplissant ces conditions : 1° = les Régulateurs, 2° = les Bougies. Dans les premiers un mécanisme régulateur compense l'usure des charbons en déterminant leur rapprochement : les crayons sont généralement verticaux et placés l'un au-dessus de l'autre. Dans les seconds, les

baguettes de charbon sont placées parallèlement à des distances fixes, avec interposition d'une matière iso-lante : le système régulateur est supprimé.

Les premiers fonctionnent généralement avec des courants continus, tandis que les seconds exi-gent des courants alternatifs, par suite de l'usure inégale des 2 charbons sous l'action d'un cou-rant continu.

L'étude des Bougies fera l'objet de la prochaine leçon.

3ᵉ Leçon.

Des bougies électriques.

Nous avons vu que si l'on produit un arc voltaïque dans le vide, il y a simplement transport de charbon mais non usure.

Un tel système constituerait donc un régulateur par excellence car il supprimerait les mécanismes plus ou moins compliqués actuellement en usage.

Mais de nombreux inconvénients entraînent l'impossibilité de se placer dans le vide :

En premier lieu il est nécessaire, après un premier contact, de produire l'écartement des charbons afin de déterminer l'allumage.

2° = Il serait tout à fait illusoire de compter uniquement sur ce système pour obtenir une régulation parfaite et maintenir l'écart constant.

3° = Enfin il se produit un dépôt sur les globes renfermant les crayons de charbon, dépôt qui amène

très rapidement l'obscurcissement de ces globes et une diminution considérable du rendement lumineux.

Remarquons que le fait que nous venons de mentionner se produit avec les lampes à incan-descence surtout lorsqu'elles sont poussées et amène rapidement aussi une diminution de leur pouvoir éclairant.

Pour toutes ces raisons, la production de l'arc dans le vide a dû être abandonnée et l'on s'est borné à l'utiliser dans l'air.

Or, nous savons que, dans ces conditions, il y a combustion et par suite consommation de charbon; il est donc essentiel d'imaginer un système qui, en dépit de cette usure, main-tienne constante la longueur de l'arc voltaïque.

Plusieurs procédés ont été employés:

Le plus naturel – bien que par ordre chronolo-gique il ne soit pas le premier – consiste à placer deux baguettes de charbon parallèlement l'une à l'autre à une distance convenable pour la formation de l'arc et réglée une fois pour toutes. Un tel système porte le nom de bougie électrique.

La première bougie réellement industrielle fut inventée par M. Jablochkoff, ancien officier russe,

et date de 1876 (1).

Dans ce système deux conditions doivent être réalisées :

1° — Il faut empêcher l'arc de jaillir entre deux points quelconques des baguettes de charbon parallèles, et l'astreindre à se maintenir à l'extrémité des baguettes ;

2° — Il faut évidemment, pour que la longueur de l'arc soit constante, que les deux charbons s'usent également.

On satisfait à la première condition de la manière suivante :

Les deux crayons sont isolés par une substance qui se volatilise en même temps qu'eux. Cette matière isolante est constituée par un mélange de deux parties de sulfate de chaux et une partie de sulfate de baryte. Le sulfate de chaux seul colorerait la lumière en rouge ; cette coloration est compensée par le sulfate de baryte qui donne précisément la teinte complémentaire c'est-à-dire le vert. Ce mélange porte le nom de colombin.

---

(1) L'invention des régulateurs est bien plus ancienne : les premières recherches faites par Foucault en France et Staite en Angleterre remontent à 1848. J. Duboscq a attaché son nom au premier régulateur construit. Le régulateur Serrin date de 1860.

La deuxième condition est assez délicate à remplir au moins dans le cas de courants continus ; on sait qu'avec ces courants l'usure du charbon + est environ deux fois plus grande que celle du charbon − . Pour compenser cette différence on a essayé d'employer dans les bougies un charbon + deux fois plus gros que le charbon − mais on n'obtient alors qu'une régulation absolument imparfaite.

La solution, trouvée dès l'origine par M. Jablochkoff, consiste dans l'emploi de courants alternatifs avec des crayons égaux.

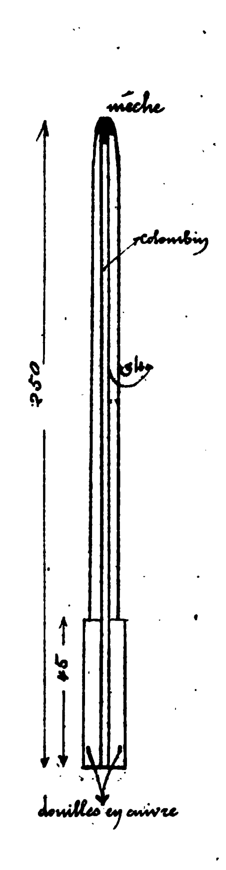
Remarquons que cette nécessité de courants alternatifs a eu pour résultat la création de la première machine industrielle à courants alternatifs réalisée par Gramme (1)

L'appareil doit en outre être complété par un système d'allumage. Le plus simple consiste en une mèche de charbon réunissant les deux baguettes : par le passage du courant cette mèche rougit, brûle et détermine l'amorçage de l'arc.

---

(1) A cette époque on ne connaissait en effet, comme machine industrielle, que la machine à aimants permanents de la Société l'Alliance employée pour l'éclairage des phares.

Pour amener le courant à la bougie on emploie l'artifice suivant :



L'extrémité inférieure des crayons est engagée dans des douilles en cuivre présentant une fente de 2 à 3 m/m. de largeur. Ces deux douilles sont réunies par une cloison isolante composée d'un mélange non fusible de kaolin, de magnésie, de sulfate de chaux et d'eau légèrement gommée.

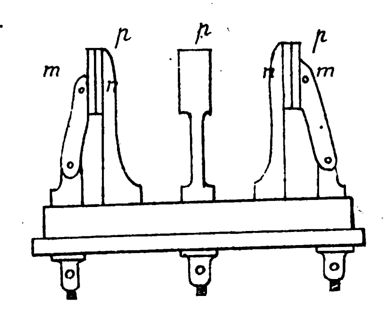
Les bougies sont montées dans un chandelier spécial amenant le courant aux deux douilles et par suite aux deux baguettes de charbon.

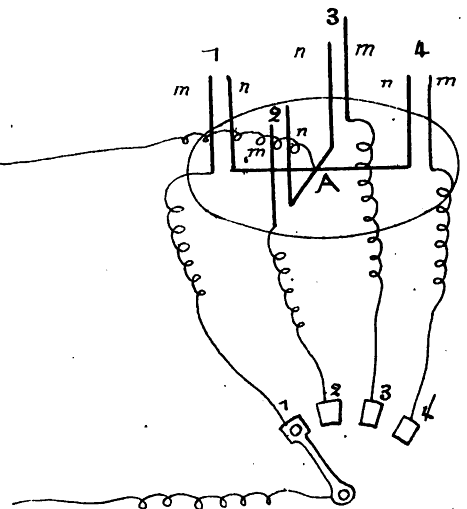
L'inconvénient de ces bougies réside surtout dans leur usure rapide : pour augmenter leur durée on les recouvre quelquefois d'un dépôt de cuivre mais cela au détriment de la régularité de la lumière. Malgré cette précaution, leur durée ne dépasse pas deux heures et l'on a été conduit à employer des chandeliers spéciaux permettant le montage d'un certain nombre de bougies fonctionnant successivement au fur et à mesure des

besoins.

Il en existe plusieurs modèles :

Le chandelier le plus généralement employé est représenté par la fig. ci-contre ; on les construit pour 4 ou 6 bougies. Ces dernières sont fixées dans des pinces p formant mâchoires : l'une d'elles n est fixe, l'autre m est mobile et sollicitée par un ressort qui assure un bon contact. Les mâchoires fixes communiquent avec une borne centrale A reliée à la machine. Quant aux machoires extérieures elles communiquent généralement avec un commutateur permettant de les mettre successivement en communication avec la seconde borne de la machine.





Cette disposition est très simple mais elle a l'inconvénient d'exiger une surveillance constante.

On a pu éviter cet assujettissement par l'emploi

de systèmes spéciaux plaçant automatiquement dans le circuit une bougie neuve à la place d'une bougie usée.

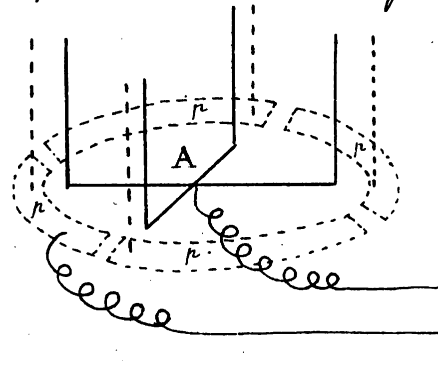
Plusieurs chandeliers ont été imaginés dans ce but :

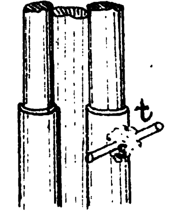
Un des plus anciens est caractérisé par un ressort maintenu contre les bougies à l'aide d'un fil métallique. Quand la bougie est consumée, le ressort bascule et place dans le circuit la bougie suivante.

Chandelier Clariot — C'est le chandelier adopté par les grands magasins du Louvre.

Il est basé sur le même principe que le précédent mais avec un dispositif tout différent.

Il peut recevoir 4 bougies ; les machoires intérieures sont comme précédemment en communication avec une borne centrale A. Les machoires extérieures sont en communication chacune avec une plaque p placée sous le chandelier.





Ces plaques sont reliées entr'elles au moyen de quatre

butoirs coniques, sous l'action d'un ressort.

Chaque bougie est munie d'une petite tige métal-lique t maintenue au moyen d'une goutte de soudure très fusible S ; cette petite tige, lorsqu'on introduit la bougie dans ses pinces, fait fléchir le ressort, ainsi que le butoir conique, et isole les bougies des unes des autres. Un commutateur permet d'amener le courant à l'une d'entre elles. Cette bougie brûle et quand l'arc est arrivé à hauteur de la soudure la petite tige cède sous l'action du ressort et met en circuit la bougie voisine qui brûle jusqu'à ce que la fusion de la goutte de soudure mette la bougie suivante dans le circuit.

Chandelier à dérivations — Ce système est d'une extrême simplicité : les bougies, au nombre de quatre, sont montées en dérivation au moyen des mâchoires qui les reçoivent. Le courant au début passe dans toutes les bougies : celle qui présente la moindre résistance s'allume et se maintient généralement en fonction jusqu'à son usure complète. A ce mo-ment l'arc jaillit entre les crayons de celle qui est encore la moins résistante et ainsi de suite. Mais un tel système, très avantageux de prime abord, présente de nombreux inconvénients. En premier lieu, les dérivations qui s'établissent

dans les bougies non allumées constituent une perte, ensuite il peut arriver que plusieurs amorces s'allument en même temps, qu'une bougie s'al-lume avant l'extinction d'une autre, bref c'était trop se fier au hasard des circonstances et le système suivant; dérivé de l'appareil précédent et de celui à changement automatique, est de beaucoup préférable.

Chandelier Bobenrieth — A l'inverse des précédents ce sont les mâchoires extérieures qui sont reliées à une rondelle métallique en commu-nication avec une des bornes de la machine. Les machoires intérieures sont chacune en commu-nication avec une tige flexible maintenue au contact au moyen d'un anneau fusible; ces tiges flexibles communiquent toutes avec le second pôle de la machine. Dans ce système le courant est encore dérivé dans toutes les bougies, mais ce qui le caractérise c'est la grande différence de résistance des amorces, qui varie de 20.000 à 100000 ohms. La bougie la moins résistante s'allume très rapidement et la perte par dériva-tion dans les autres est très faible par suite de leur grande résistance.

Malgré la simplicité relative de ce mode

d'utilisation de l'arc voltaïque, ce système qui, à son apparition, a joui d'une certaine faveur ne s'est pas très répandu. Cela tient au rendement plus faible que celui des arcs, à la lumière peu régu-lière, à la difficulté de rallumer une bougie éteinte.. etc..., Aussi passerons nous sous silence les autres appareils dérivés de la bougie Jablochkoff tels que les bougies Jamin, Wilde, les lampes Million, Soleil, etc...,

Régulateurs à arc

Le régulateur, plus ancien que la bougie, et qui lui avait un instant cédé la place, a repris sa prépondé-rance.

Le mécanisme compliqué des premiers régulateurs s'est notablement simplifié et l'ingéniosité des inven-teurs se traduit par un choix de plus de 2000 mo-dèles pour ne compter que ceux qui font l'objet de brevets d'invention.

C'est pourquoi nous ne pouvons songer à les étudier en détail. Nous nous bornerons à faire une classification et à étudier quelques types se ratta-chant à la classification établie.

Généralement les charbons sont placés l'un au-dessus de l'autre; par suite de leur usure, la longueur

de l'arc augmente et, à un moment donné, la tension du courant n'étant plus suffisante, l'arc s'éteint.

De là résulte la nécessité d'un mécanisme entrant en action au moment opportun pour déterminer le rapprochement des charbons.

D'une manière générale l'allongement de l'arc produit dans le fonctionnement électrique de l'appareil certaines perturbations ; ce sont ces perturbations mêmes que nous allons utiliser pour déterminer le fonctionnement mécanique du système destiné à rapprocher les deux charbons.

Quelles sont ces perturbations ?

Soit I l'intensité du courant alimentant un arc, E la force électromotrice du générateur, R la résistance apparente de l'arc, R' la résistance des autres parties du circuit, nous aurons :

$$I = \frac{E}{R + R'} \quad (1)$$

et la différence de potentiel aux charbons sera donnée par l'expression

$$RI = \frac{ER}{R + R'} = \frac{E}{1 + \frac{R'}{R}} \quad (2)$$

Lorsque l'arc augmente de longueur sa résistance R augmente aussi, la première de ces formules nous montre que, dans ces conditions, l'intensité I

diminue.

La seconde nous indique que la différence de potentiel aux charbons augmente quand R augmente.

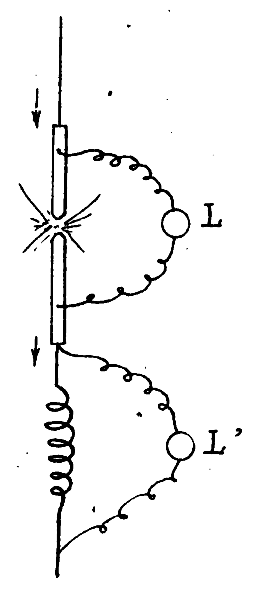
Ce fait est encore plus vrai dans les lampes à arc, où l'on est en présence d'une résistance apparente qui croit plus vite que ne croîtrait une résistance ordinaire (1)

Vérifions le fait expérimentalement :

Pour cela produisons un arc et mesurons :

1° = la différence de potentiel entre les deux charbons,

2° = l'intensité du courant qui le traverse.



La première mesure sera fournie par exemple, par une lampe L placée en dérivation entre les deux charbons ; la seconde le sera par une lampe L' en dérivation sur une résistance fixe traversée par tout le courant.

Nous remarquerons :

1° _ que la différence de

(1) En effet R augmente pour deux raisons : d'abord comme une résistance ordinaire lorsque sa longueur augmente ; ensuite parceque, l'intensité diminuant, la section de l'arc diminue aussi (Voir la leçon précédente).

potentiel, mesurée par l'éclat de la lampe L, augmente à mesure que l'arc s'allonge ;

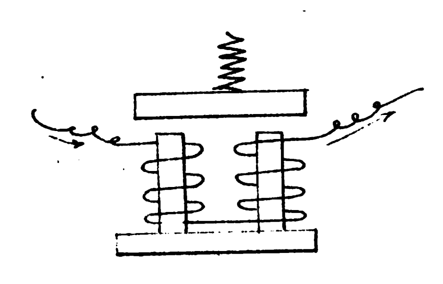
2° — que l'intensité, mesurée par l'éclat de la lampe L', diminue quand la différence de potentiel augmente.

Ce sont, ainsi que nous l'avons dit précédemment, ces perturbations, c'est-à-dire ces variations de l'intensité et de la différence de potentiel, que nous utiliserons à produire des variations correspondantes dans un électro-aimant actionnant le mécanisme régulateur.

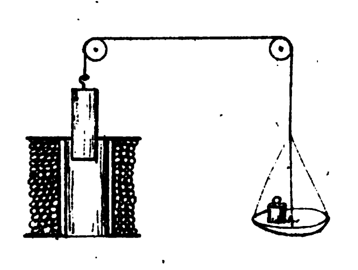
L'électro-aimant que nous emploierons pourra être disposé de deux façons :

1° — à la façon ordinaire en le munissant d'une armature séparée par un entrefer ; on sait que dans ce cas l'armature tend à fermer le circuit magnétique ; (fig. ci-dessous)

2° — en employant un électro-aimant tubulaire ou bobine creuse dans laquelle un noyau de fer doux se déplacera ou se contrera magnétiquement.



L'action de l'électro se conçoit très facilement en considérant



que les lignes de force tendent à se raccourcir. Ce dernier mode aura même le grand avantage de permettre l'emploi des courants alternatifs. Dans le 1er cas on n'a que des vibrations isochrones, dans le second on constate une attraction du noyau.

Notons que dans le cas où l'on utilise des courants alternatifs il est essentiel d'employer des noyaux formés de fils ou de lames de fer isolés, en un mot on doit feuilleter les noyaux afin d'éviter les courants de Foucault qui les échauffent en pure perte.

Les mouvements de ces noyaux, utilisés convenablement, pourront suffire au réglage des lampes à arc, mais ils ne pourront déterminer l'allumage. On sait, en effet, qu'un arc ne s'allume pas de lui-même et que les crayons doivent préalablement être mis au contact puis séparés pour que l'arc jaillisse.

Le système d'allumage est donc un complément indispensable des lampes à arc, parfaitement distinct du système de réglage. Bien souvent,

on facilitera l'intelligence de régulateurs, au premier abord très compliqués, en commençant par distinguer soigneusement, pour les étudier à part, les parties du mécanisme destinées à produire l'allumage, et les parties destinées au réglage.

Si le charbon supérieur seul est mobile au point de vue du réglage, le point lumineux sera variable et s'abaissera constamment. Dans ce cas, l'électro pourra être employée à déclancher un mouvement d'horlogerie laissant le charbon supérieur descendre sous son propre poids.

Mais il peut être nécessaire de conserver la position du point lumineux à peu près fixe dans l'espace (c'est ce qui a lieu pour les phares, les projecteurs etc...,). Dans ce cas, il faut faire monter le charbon inférieur pendant que le supérieur descend. Si les crayons sont de même grosseur, la course du charbon positif devra être deux fois plus grande que celle du charbon négatif; si le charbon supérieur est deux fois plus gros que l'inférieur les mouvements de montée et de descente pourront être égaux.

$r = \frac{R}{2}$

Il est d'ailleurs facile d'imaginer une très grande quantité de dispositions simples rendant les deux charbons solidaires et maintenant le point lumineux fixe, la figure ci-avant en représente une; cette condition ne compliquera donc pas beaucoup les appareils, et nous n'aurons pas à nous en préoccuper dans la suite; ici encore on pourra utiliser le poids du charbon supérieur pour produire le rapprochement des deux charbons.

Nous admettrons pour les régulateurs à arc la classification suivante :

1° _ l'électro-aimant est monté en série avec l'arc, il est donc traversé par la totalité du courant, et doit être par suite bobiné de gros fil, d'abord en raison de l'intensité du courant qui le traverse et ensuite pour diminuer sa résistance.

Un tel régulateur pourra être représenté schématiquement par la fig. ci-contre. Un levier articulé autour d'un point O est attiré par l'électro A, l'attraction est réglée au moyen

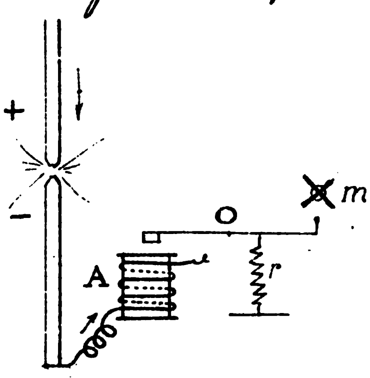


Schéma d'un régulateur en tension

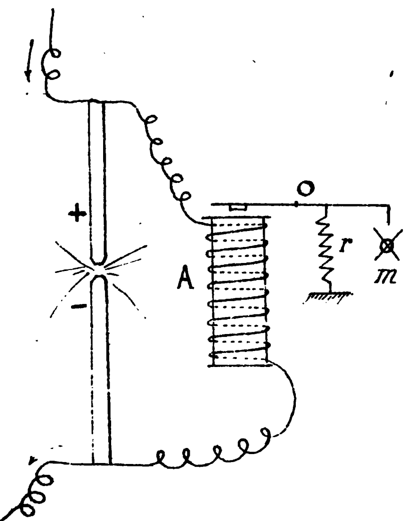
au moyen d'un ressort r. Le levier, par suite de son mouvement d'oscillation, enclanche ou dé-clanche un mouvement d'horlogerie figuré par le moulinet m ; c'est ce mouvement d'hor-logerie qui règle la descente du charbon positif.

Voici le fonctionnement :

L'arc étant allumé, si sa longueur devient trop grande la résistance augmente et l'in-tensité diminue ; l'action de l'électro diminue et le levier obéit au ressort, le mouvement d'hor-logerie se déclanche et le charbon positif descend jusqu'à ce que, l'intensité ayant atteint sa valeur normale, le mouvement d'horlogerie soit de nouveau arrêté.

Les régulateurs de cette première classe sont dits régulateurs en tension.

2° — L'électro-aimant est monté en dérivation sur les charbons ; il n'est donc par-couru que par une dérivation du courant total ; il doit par consé-quent être à enrou-lement de fil fin



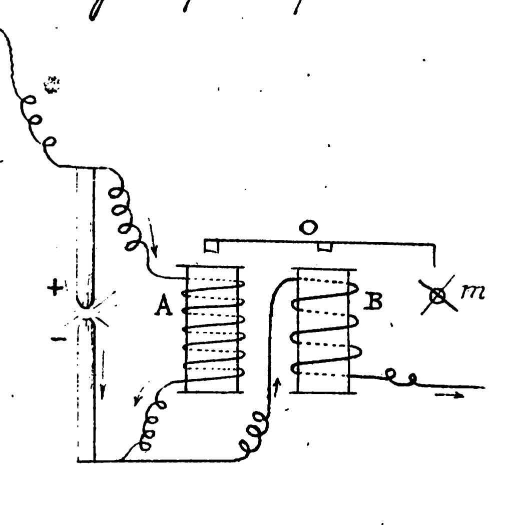
et présenter une résistance relativement grande.

Dans ce système, à l'inverse du précédent, le déclanchement du mouvement d'horlogerie est déterminé par l'attraction de l'armature sous l'action de l'électro :

Au début l'arc étant allumé, si la résistance augmente, l'intensité du courant dérivé augmente aussi et l'électro entre en action.

Les régulateurs de ce système portent le nom de régulateurs en Dérivation.

3° — Le 3e système n'est que la combinaison des deux précédents ; il comporte deux électros, l'un à gros fil B placé dans le circuit, le second A à fil fin placé en dérivation.



Ce dernier joue le même rôle que dans la 1ère classe des régulateurs, tandis que l'électro à gros fil remplace le ressort r.

Les régulateurs de cette classe prennent le nom de régulateurs différentiels ; ils sont d'une sensibilité plus grande que les autres. On remarquera en effet

que le résultat qu'on obtient est le même que si, dans les régulateurs de la 1ère classe, la tension du ressort diminuait à mesure que le courant lui-même diminue.

De ces 3 classes de régulateurs ceux qui appartiennent à la première sont les moins employés, dans le cas des distributions urbaines ; ceux de la seconde sont les plus employés et ceux de la troisième, bien que les plus sensibles, ne sont pas les plus répandus, à cause de leur complication ; l'emploi de deux solénoïdes n'exclue pas en effet l'emploi du ressort compensateur.

Propriétés particulières de chacune des Classes de Régulateurs

---

1° — Régulateur en tension = Dans cette classe de régulateurs, nous pouvons admettre que lorsque l'intensité I sera plus petite qu'une quantité déterminée A ampères, le mécanisme sera déclanché et les charbons se rapprocheront ; lorsque l'intensité sera plus grande qu'une seconde quantité B ampères le mécanisme sera enclanché et les

charbons seront au repos.

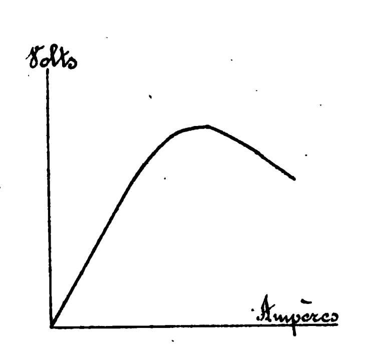
L'intensité du courant qui alimente l'arc sera donc comprise entre deux limites A et B, car on a A > I > B les perfectionnements à apporter à un régulateur doivent tendre à rapprocher le plus possible ces deux limites. C'est pourquoi on donne encore à ces régulateurs le nom de régulateurs à courant constant.

Ces régulateurs sont essentiellement monophotes (1) Il est facile de voir en effet ce qui arriverait si on en montait plusieurs en tension sur le même circuit: il est clair d'abord que si ce circuit est alimenté à courant constant (Voir le cours de 1ère année), aucun mécanisme régulateur ne peut fonctionner; s'il est alimenté à potentiel constant, en raison des inégalités inévitables entre les charbons, on ne peut s'opposer à ce que l'un des arcs s'allonge plus vite que les autres; alors tous les mécanismes régulateurs entrent en jeu, l'arc trop long redevient normal, mais les autres deviennent trop courts, ce qui amène fatalement la mise en court circuit des arcs les uns après les autres.

---

(1) Un régulateur est monophote quand on ne peut en placer qu'un seul dans le même circuit; il est polyphote dans le cas contraire.

Avec ce système, il se produit un court-circuit toutes les fois que les charbons viennent au contact.



Si le régulateur est alimenté par une <u>dynamo</u>-<u>série</u> l'inconvénient n'est pas très grave car en se reportant à la caractéristique d'une telle machine (voir le cours de l'année dernière) on remarque que, lorsqu'un court-circuit se produit, l'intensité augmente rapidement et l'on se trouve dans la partie descendante de la courbe, c'est-à-dire que la force électro-motrice diminue rapidement.

Dans le cas où l'on emploie une machine en dérivation, il est bon d'intercaler une résistance additionnelle en série dans le circuit sans quoi la machine se désamorcerait lorsque les charbons seraient au contact ; cette résistance absorbe évidemment en pure perte une partie de l'énergie.

2° — Régulateurs en dérivation.

L'intensité du courant qui parcourt l'électro de réglage est $i = \frac{e}{r}$

e différence de potentiel aux charbons, r résistance de l'électro, habituellement très grande. Cette résistance est constante l'intensité sera donc proportionnelle à e. Par suite le mécanisme régulateur fonctionnera lorsqu'on aura $i > a$ et cessera de fonctionner pour $i < b$.

On aura donc $ar < e < br$; e sera donc compris entre deux limites ar et br qui devront encore être aussi rapprochées que possible.

C'est pourquoi ces régulateurs sont encore appelés régulateurs à potentiel constant.

Ces régulateurs conviennent parfaitement dans le cas de distribution à potentiel constant, mais il est nécessaire de placer une résistance R en série avec eux.

R

Supposons un seul régulateur fonctionnant sur une distribution à 50 volts; on peut se proposer de déterminer la résistance R, c'est-à-dire la meilleure valeur à lui donner au point de vue du réglage (1)

Imaginons qu'un courant de 20 ampères circule

---

(1) Ce raisonnement est dû à M. de Puydt, cité par M. E. Gérard.

et que, par suite de l'usure des charbons, il se produise une diminution de 2 ampères et une augmentation de 1 volt aux bornes. Pour gagner ce volt il faut utiliser la diminution de pertes en volts RI ou 2R. Par suite

$$2R = 1$$

$$\text{d'où } R = \frac{1}{2} \text{ ohm}$$

Régulateurs différentiels.

L'équilibre exige un rapport déterminé entre e et i, l'équation de ce régulateur est donc

$$ei = \text{constante}$$

ou résistance apparente = constante. (1)

c'est pourquoi ces régulateurs sont dits à résistance constante. Ce sont les plus parfaits, ils sont essentiel-

(1) En effet supposons que le solénoïde b qui est dans le circuit possède n spires et soit parcouru par un courant I, que le solénoïde a en dérivation ait n' spires et soit parcouru par un courant i'. Les attractions exercées par ces deux solénoïdes sont proportionnelles aux ampères-tours et à un coefficient particulier à chacun d'eux. Quand l'équilibre est atteint ces attractions sont égales et l'on a :

$$KnI = K'n'I' \text{ qu'on peut écrire:}$$

-lement polyphotes puisqu'ils se comportent en réalité comme s'ils étaient des résistances métal-liques fixes placées dans le circuit.

Description de quelques régulateurs particuliers

Nous nous bornerons à la description de quel-ques types bien caractérisés et plus particulière-ment de ceux dont nous aurons pu étudier de visu le fonctionnement ; nous suivrons la classi-fication donnée précédemment : (1)

1° — Régulateurs en série — Nous décrirons d'abord le régulateur Serrin le premier qui ait fonctionné avec régularité ; il est un peu délaissé aujourd'hui, à cause de la complication de son mé-canisme de réglage.

(Fig. schématique du régulateur Serrin)

$$Kn\,(I - i') = (K'n' + K'n)\,i'$$

Mais $i' = \frac{E}{R}$ (R étant la résistance du solénoïde en dérivation -

d'où $(K'n' - Kn)\,\frac{E}{R} = Kn\,(I - i')$

ou enfin $\frac{E}{I - i'} = \frac{K.Kn}{K'n' - Kn}$ or, le membre de gauche n'est autre que la résistance apparente de l'arc ; l'équation indique donc que cette résistance doit être constante.

(1) Tous les régulateurs décrits ci-dessous ont été montrés au cours.

Le porte charbon positif constitue le moteur de l'appareil ; il tend à descendre par son propre poids ; il est taillé en crémaillère à la partie inférieure et, pendant la descente, communique le mouvement à la roue a qui fait partie d'un équipage de roues dentées. Sur l'arbre de cette première roue est calée une poulie b d'un diamètre moitié moindre. Cette poulie transmet le mouvement au charbon négatif par l'intermédiaire d'une chaîne Vaucanson passant sur une poulie c et venant se fixer à l'extrémité du crochet f ; le charbon négatif est donc animé d'un mouvement moitié moindre que le charbon positif. Le tube portant le charbon négatif glisse à frottement dans un second tube solidaire d'un parallélogramme g h i j articulé autour des points g et j et portant à sa partie inférieure une armature en fer doux D. En regard de cette armature se trouve un électro-aimant E qui l'attirera lors de la fermeture du circuit et déterminera l'écart des charbons, par suite l'arc jaillira.

La descente du charbon positif est régularisée par le train d'engrenages qui se termine par un moulinet m constituant le système d'enclanchement. Ce dernier est produit par un petit linguet e fixé au côté hi du parallélogramme.

et pénétrant dans le moulinet lorsque le parallélo-
-gramme est attiré par l'électro E. Le porte-charbon négatif et le parallélogramme sont équilibrés par des ressorts.

En résumé il est facile de voir que : au com-
-mencement les charbons sont écartés ; le positif descend par son propre poids, le négatif monte sollicité par la chaîne Vaucanson ;

lorsque les charbons sont au contact, le circuit est fermé, l'électro entre en action, le parallélogr. s'abaisse, les charbons s'écartent, l'arc jaillit, en même temps que le linguet porté par le pa-
-rallélogramme enclanche le moulinet et s'oppose au mouvement des charbons.

Lorsque l'arc s'allonge ; l'intensité diminue ainsi que l'action de l'électro, le parallélogramme remonte sous l'action des ressorts, déclanche le mou-
-linet et permet le rapprochement des charbons et ainsi de suite.

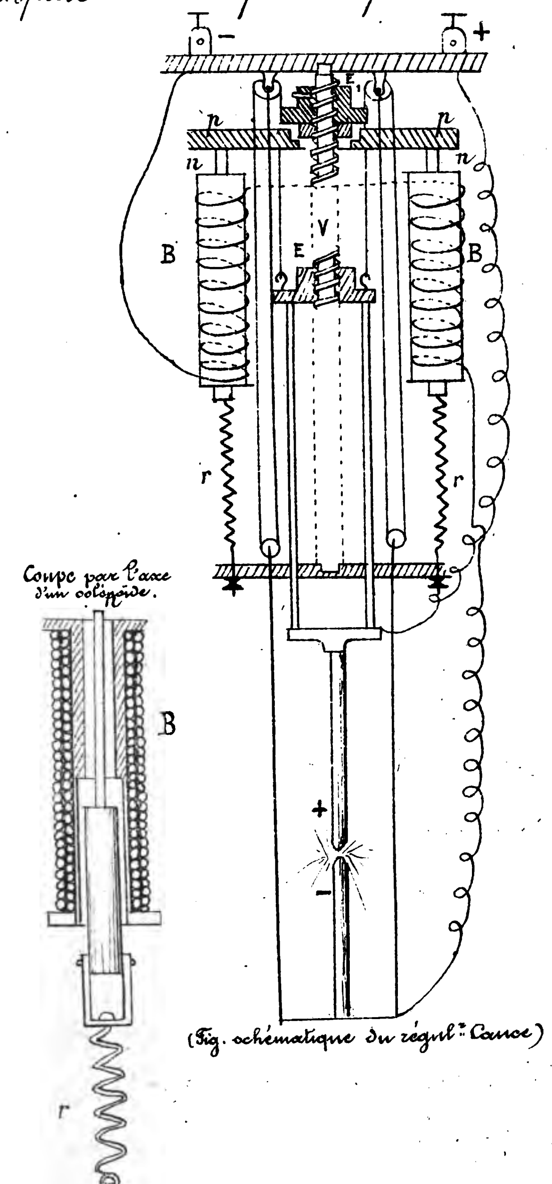
Régulateur Cance.

—

C'est un des plus simples régulateurs ; le mécanisme en est très ingénieux.

L'organe principal est une vis V à pas très

rapide sur laquelle peut se déplacer un écrou E.



(Fig. schématique du régul^r Cance)

fixé à la partie supérieure d'un cadre portant le charbon positif. Ce cadre tend à descendre sous l'action de la pesanteur et à entraîner l'écrou E, mais comme ce dernier ne peut tourner il en résulte un mouvement de rotation de la vis V qui est libre de tourner sur deux tourillons ménagés aux extrémités. L'écrou E est donc le <u>moteur</u> du système. Au sommet de la vis se trouve un 2e écrou E_1 reposant sur une embase portée par la vis et un plateau pp supporté par les noyaux nn des solénoïdes

BB. L'attraction des noyaux est réglée à l'aide de ressorts antagonistes r, r.

Le fonctionnement est des plus simples :

Au repos les charbons sont en contact ; la résistance est faible et par suite l'intensité est grande ; les noyaux par suite de leur forme dissymétrique sont fortement attirés et soulèvent le plateau de friction p p qui soulève lui-même l'écrou E_1 ; la vis est par suite obligée de tourner et par l'intermédiaire de l'écrou E soulève le charbon + et l'arc jaillit.

Tant que l'arc conserve sa longueur normale la pression du plateau empêche la vis de tourner et les charbons de se rapprocher mais, dès que l'arc s'allonge, la pression du plateau diminue, la vis tourne et les charbons se rapprochent.

L'écrou E_1 est donc le système allumeur.

La longueur de l'arc est donc réglée par le frottement du plateau de friction sur l'écrou E_1.

L'action magnétique des noyaux est d'ailleurs réglable au moyen de deux ressorts r.

Remarquons que le point lumineux est fixe : ce résultat est obtenu par un double palan actionné par l'écrou moteur E.

Enfin à signaler la disposition mécanique des écrous E et E_1 qui ne portent pas de filetage intérieur mais simplement 3 petits goujons coniques pénétrant dans le creux du filet ; cette disposition atténue les frottements toujours relativement grands de la vis et de l'écrou.

Cette lampe est évidemment monophote ; toutefois on peut en monter un certain nombre en dérivation et même les employer concurremment avec les lampes à incandescence.

Régulateur Gramme

Dans ce régulateur le point lumineux est variable ; l'allumage est produit par un électro A fixé au bâti de l'appareil. Il peut attirer une traverse mn reliée par des tiges à la traverse inférieure op qui reçoit le charbon négatif. Deux

A. Electro-aimant d'allumage.
B. d° de réglage.

(Figure schématique du régul.r Gramme)

ressorts r r tiennent le cadre soulevé c'est-à-dire éloignent en temps ordinaire la traverse m n des électros. Le rapprochement des charbons est réglé au moyen d'un second électro B, à fil long et fin, placé en dérivation sur le circuit principal.

Voici le fonctionnement de l'appareil :

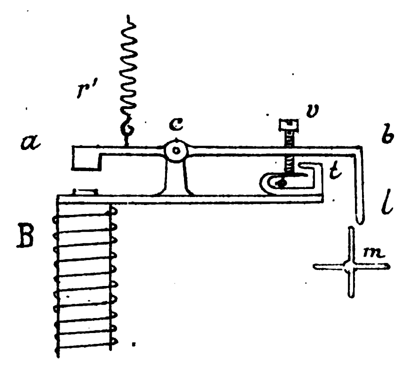
Au début, les crayons se touchent, l'intensité du courant est maximum : l'électro A attire l'armature m n, les charbons s'écartent et l'arc jaillit. Quand il devient trop grand, l'intensité dans le circuit dérivé augmente l'électro B attire l'extrémité a du levier ab qui peut osciller autour du point c. L'extrémité l du levier ab abandonne le moulinet m et déclanche le mouvement d'horlogerie qui permet au charbon positif de descendre. Un ressort r' permet le réglage du mouvement du levier ab.

Le régulateur Gramme est muni d'un dispositif original et ingénieux qui suspend l'action de l'électro en dérivation dès que le levier se meut sous l'action de l'électro.

Ce dispositif a été supprimé sur la figure schématique du régulateur afin de la simplifier, il est représenté ci-après

Le levier ab porte une vis v qui appuie sur le ressort à lame s lorsque l'action du

ressort à boudin r' est supérieure à l'action du solénoïde à fil fin ; lorsque ce dernier attire l'extrémité a du levier, la vis v abandonne le ressort s dont la course est limitée



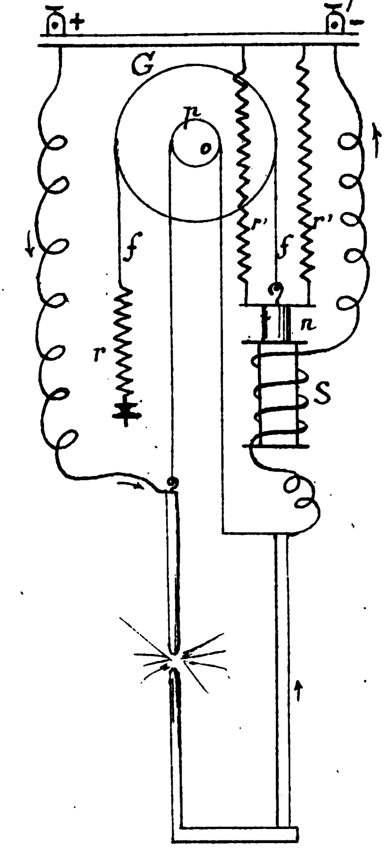
par un arrêt t ; dès lors le circuit de l'électro B est rompu, l'action du ressort r' devient prédominante, d'où une nouvelle fermeture du circuit de l'électro et ainsi de suite.

Il en résulte une succession continue d'interruptions et de rétablissements de courant qui augmente la sensibilité de l'appareil en déterminant un mouvement lent mais régulier du porte-charbon ; malheureusement il en résulte un bruit assez désagréable.

Régulateur Patin

Appartient à la catégorie des régulateurs à frein. Le charbon positif descend sous l'action de son propre poids. L'action d'un mobile solidaire du charbon positif est suspendue à l'aide d'un

frein mis en action par les variations d'intensité du courant. Le schéma ci-contre en montre le dispositif.



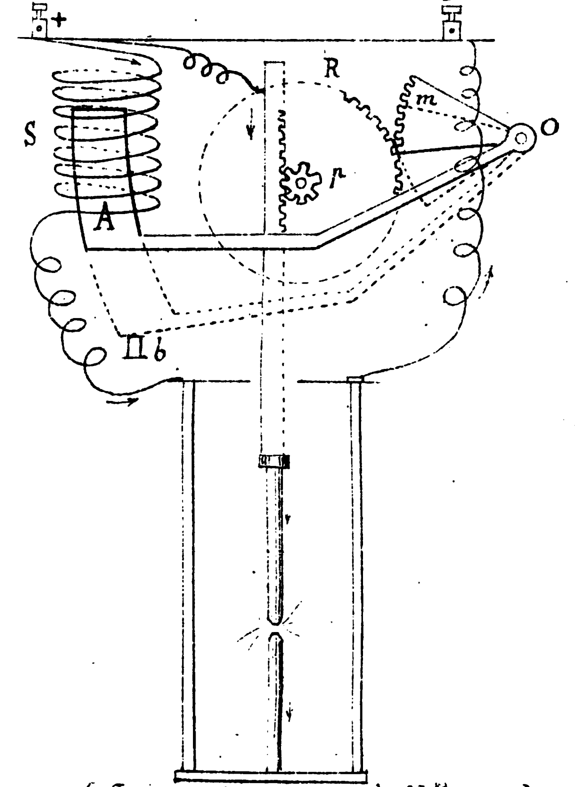
Les deux charbons sont reliés entre eux par une cordelette en soie passant sur une poulie p, mobile autour du point o. Sur le même axe que celle-ci se trouve une poulie à gorge G de plus grand diamètre dans la gorge de laquelle passe un fil f relié d'une part à un ressort de réglage r et de l'autre à un noyau n qui peut pénétrer dans l'intérieur d'un solénoïde s ; l'attraction est compensée par deux ressorts antagonistes r'. Des fils souples amènent le courant aux porte-charbons.

Au repos, les charbons sont au contact, le solénoïde s attire le noyau n et détermine, par l'entraînement du fil, la rotation des poulies : les charbons s'écartent et l'arc jaillit. Quand l'arc s'allonge l'intensité

diminue, le solénoïde abandonne le noyau n et laisse défiler la poulie et rapproche les charbons jusqu'à ce que l'arc ait sa longueur normale ; à ce moment le noyau est attiré et le fil formant frein arrête le mouvement.

Lampe Brianne

Appartient à la classe des lampes en dérivation.



(Figure schématique du régul.r Brianne)

Le mécanisme en est très simple et très ingé-
-nieux.

Elle comprend un solénoïde à fil fin S et d'une pièce de fer doux A mobile autour d'un axe O. Sur le même axe, et solidairement avec le levier, est un secteur denté m pouvant engrener avec une roue R formant volant par sa masse. Sur l'axe de cette roue est un petit pignon p engrenant avec la crémaillère qui

porte le charbon positif.

Voici le fonctionnement du régulateur :

Au repos la palette de fer A repose sur une pièce b formant butée. Le levier et le secteur occupent la position indiquée en pointillé et les charbons sont écartés. Lorsque le courant passe, le solénoïde attire la lame A qui, par l'intermédiaire du secteur et du système denté, approche les charbons jusqu'au contact ; mais à ce moment le solénoïde mis en court-circuit abandonne la palette qui écarte les charbons et l'arc jaillit. Dès lors le solénoïde est parcouru par une fraction du courant et maintient la palette dans une certaine position d'équilibre.

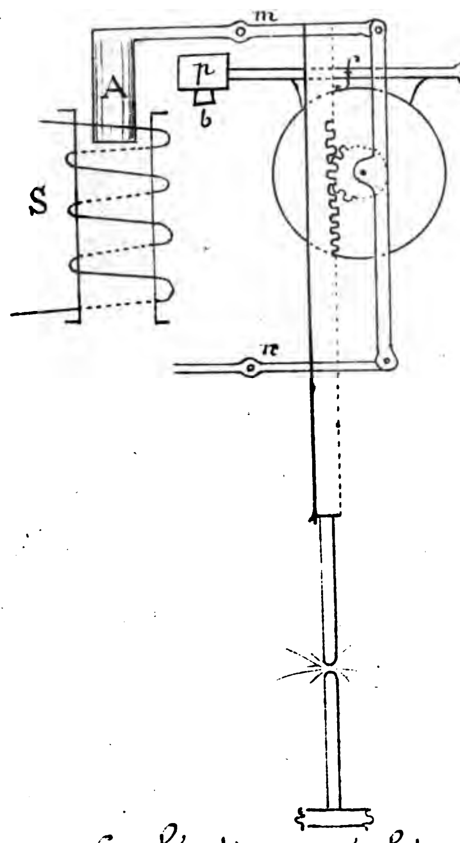
Quand l'arc s'allonge, l'action du solénoïde augmente, la palette est attirée, le secteur échappe à un moment donné laissant tourner le volant et produit le rapprochement des charbons.

L'inertie des pièces en mouvement, qui sont lourdes, assure un réglage très lent mais très régulier. La roue s'échappe pour ainsi dire que dent par dent.

Lampe Zipernowsky

Deux systèmes étaient présentés, l'un appartenant à la classe des régulateurs en tension et l'autre à la classe des régulateurs différentiels.

<u>Lampe en tension</u> — Un solénoïde en série S attire un noyau A. Ce noyau fait partie d'un système articulé mobile autour des points m et n et portant tout le mouvement d'horlogerie.



(fig. schématique du régulateur Zipernowsky en série)

Au repos, les charbons se touchent ; quand le courant passe le noyau A est attiré, tout le mouvement d'horlogerie remonte ainsi que le charbon positif : l'arc jaillit. En même temps le mécanisme d'horlogerie est calé sous l'action d'un frein f muni d'un contre-poids p.

Quand l'arc devient trop grand, l'intensité diminue le noyau A remonte, le mouvement d'horlogerie s'abaisse, le contre-poids p du frein rencontre une butée b qui annule son action et laisse les rouages défiler en produisant le rapprochement des charbons. L'appareil est complété par un système amortisseur non figuré sur le schéma et qui s'oppose aux mouvements trop brusques. Il consiste en un cylindre à air et un piston actionné par le prolongement de la tige inférieure du mouvement articulé.

Lampe différentielle — Cette lampe comporte deux électro-aimants circulaires à noyaux feuilletés et disposés horizontalement. Celui du haut est en série et à gros fil, celui du bas est en dérivation et à fil fin.

Le mouvement d'horlogerie est mobile comme dans l'appareil précédent; il est porté par un levier L articulé en O et portant à une de ses extrémités deux masses de fer doux m et n et à l'autre un contre-poids en plomb q.

Les porte-charbons sont supportés par de petits rubans de cuivre très flexibles venant

s'enrouler sur deux poulies p et r.

Au repos, les charbons sont au contact, le solénoïde en série A attire la pièce m du levier qui oscille autour du point o ; ce mouve--ment détermine par l'intermé--diaire de la poulie p l'allu--mage de l'arc.

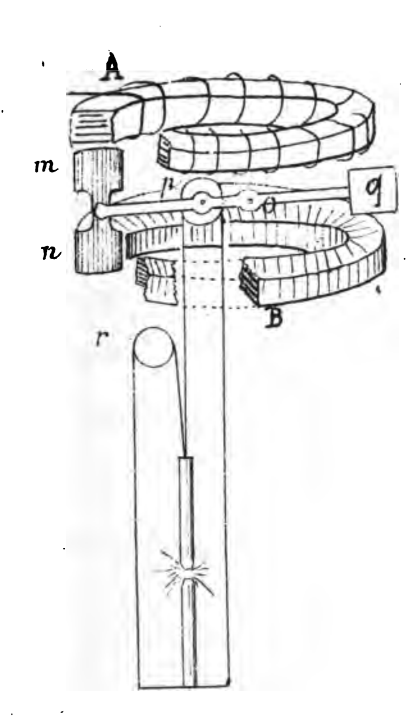


Figure schématique du régulateur Zipernowsky différentiel.

Quand l'arc s'allonge le solé--noïde en dériva--tion devient pré--dominant, le levier bascule en sens contraire et le mécanisme d'horlogerie qui était enclanché dans la position précédente, se déclanche et permet le rapprochement des charbons.

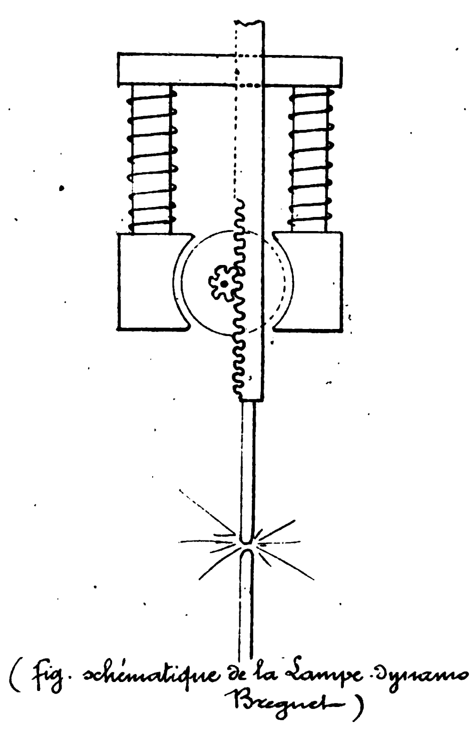
A noter dans cet appareil une prise de courant avec douille à baïonnette tout à fait analogue aux prises de courant des lampes à

incandescence.

Nous mentionnerons encore quelques régu-lateurs qui n'ont pas été montrés au cours mais qui présentent un caractère d'originalité.

Régulateur dynamo Breguet

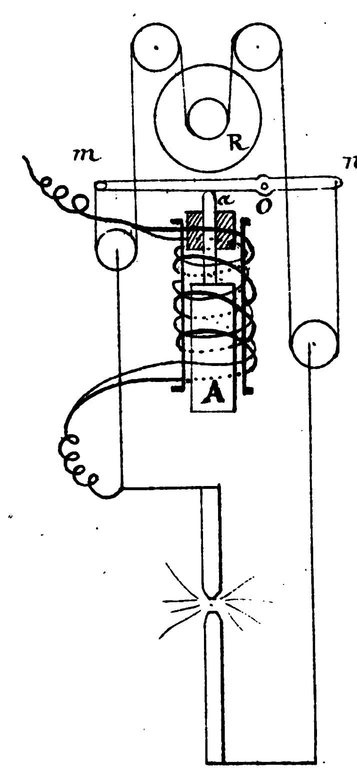
Le moteur est une petite machine dynamo dont l'arbre porte un pignon engrenant avec la crémaillère du charbon +. Le poids du porte-charbon tend à faire tourner la bobine dans un sens, tandis que le courant qui l'actionne comme réceptrice tend à la faire tourner en sens contraire. L'équilibre a lieu lorsque l'effort statique développé par l'anneau est égal au poids du porte-charbon +. Ce régulateur possède



(Fig. schématique de la Lampe Dynamo Breguet)

un amortisseur destiné à modérer les déplace-ments de l'induit.

<u>Lampe Bardon</u> :— Cette lampe a été très remarquée à l'exposition de 1889. Elle est à point lumineux fixe et se compose essentiellement d'un solénoïde A sur lequel sont deux enroulements : l'un dans le circuit, l'autre en dérivation. A l'intérieur est un noyau fixe <u>a</u> et un noyau mobile A qui se prolonge par une tige de cuivre pouvant appuyer sur un levier <u>m n</u>, mobile autour du point O.



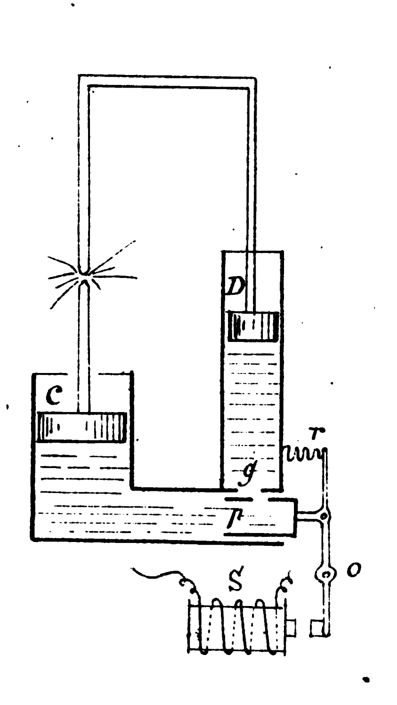
(Fig. schématique de la lampe Bardon)

Au repos, les charbons sont au contact. A la fermeture du circuit le solénoïde à gros fil attire le noyau mobile qui agit sur le levier

soulève l'extrémité m et abaisse l'extrémité n. L'arc jaillit, la roue R sur laquelle le levier fait frein est calée et empêche le rapprochement des charbons. Quand l'arc s'allonge le noyau abandonne le levier qui, lui-même abandonne la roue qui tourne et rapproche les charbons.

Lampe Stocher - Sedlaczek

L'appareil comprend deux cylindres C et D (le premier d'une section double de l'autre) dans lesquels flottent, sur de la glycérine, deux pistons portant les charbons. Les deux cylindres sont réunis à leur partie inférieure par un 3e cylindre dans lequel se trouve un piston p relié à un levier oscillant autour du point o ; c'est ce piston qui met en



communication les deux cylindres C et D à l'aide d'un orifice g. Le levier est soumis d'une part à l'action du solénoïde S intercalé dans le circuit et à l'action d'un ressort antagoniste r.

A l'allumage, les charbons sont en contact, le solénoïde attire le levier ce qui détermine un mouvement de gauche à droite du piston p qui ferme l'orifice g. Le porte-charbon descend et l'arc jaillit.

Quand l'arc grandit le solénoïde devient moins actif, le ressort r appelle le levier ce qui détermine un mouvement du piston p inverse du précédent ; l'orifice g s'ouvre, la glycérine descend du vase D en C et détermine le rapprochement des charbons.

Cet appareil, peu sensible aux trépidations, convient paraît-il à l'éclairage des trains en marche.

4e Leçon

Lampes à incandescence

Une lampe à incandescence est constituée en principe par un conducteur résistant et réfractaire (habituellement filament de charbon) placé dans le vide et maintenu à une haute température par le passage d'un courant.

En premier lieu, étudions les conditions de l'incandescence d'un conducteur parcouru par un courant.

Imaginons un filament rectiligne de section quelconque (circulaire ou polygonale) mais uniforme sur toute sa longueur.

A ——— B

Soit E la différence de potentiel entre les extrémités A et B du conducteur.

I l'intensité du courant qui le traverse.

R la résistance en fonctionnement ou à chaud (on sait que pour le charbon, à l'inverse de ce qui a lieu pour les métaux, la résistance décroit quand la température s'élève.)

La puissance dépensée dans le conducteur est :

$$W = EI = RI^2 = \frac{E^2}{R}$$

Cette puissance est entièrement transformée en chaleur et fournit une énergie rayonnante tout autour de la lampe.

Soit K la quantité d'énergie rayonnée en une seconde par centimètre carré de la surface du charbon ; Si la surface latérale du charbon est S cm² l'énergie totale rayonnée sera :

$$KS$$

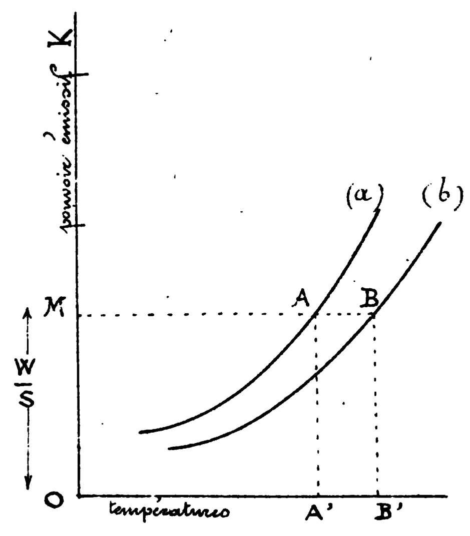
d'où l'équation fondamentale :

$$W = KS$$

Ainsi toute l'énergie apportée par le courant se répand en énergie rayonnante dans l'espace.

La quantité K définie précédemment prend le nom de <u>pouvoir</u> <u>emissif</u> <u>absolu</u> de la substance considérée.

Il dépend essentiellement de la température du corps rayonnant et croît évidemment avec elle ; en toute rigueur il dépend aussi de la température des corps environnants, mais cette influence est négligeable lorsque, comme dans les lampes à incandescence, la température du corps rayonnant est très élevée.



Il résulte des recherches du professeur H. F. Weber que le pouvoir émissif absolu est représenté en fonction de la température absolue (1) par la formule

$$K = C T e^{\alpha T}$$

a est une constante sensiblement égale à 0,0043 pour tous les corps.

C est une constante qui varie d'un corps à l'autre. Elle est égale à 0,000013 pour le charbon

(1) La température absolue égale température vulgaire + 273°.

gris ou graphite ; à 0,000017 pour le charbon noir ou charbon amorphe.

T est la température absolue ; e est la base des logarithmes népériens.

Voici un tableau donnant les valeurs de la fonction $Te^{\alpha T}$ pour les températures usuellement atteintes dans les lampes à incandescence.

T	$Te^{\alpha T}$	T	$Te^{\alpha T}$
1400°	576.10^3	1530	1100.10^3
1410	606	1540	1156
1420	637	1550	1214
1430	670	1560	1276
1440	704	1570	1340
1450	740	1580	1408
1460	777	1590	1479
1470	816	1600	1554
1480	858	1610	1634
1490	902	1620	1717
1500	948	1630	1803
1510	996	1640	1894
1520	1047	1650	1989

Si la formule précédente est exacte, le rapport des pouvoirs émissifs de deux corps à une même température est constant et indépendant de la température. En d'autres termes étant donnée une courbe a (fig. précédente) représentant le

pouvoir émissif d'un corps en fonction de la température, on en déduirait la courbe représentant le pouvoir émissif d'un corps (b) par une simple réduction proportionnelle de toute les ordonnées.

La courbe b correspond évidemment à un pouvoir émissif plus faible.

Proposons-nous de déterminer quelle sera la température atteinte par chacun de ces corps sous l'influence d'une puissance électrique déterminée W.

La question est facile à résoudre, si nous nous reportons à la formule

$$K = \frac{W}{S}$$

En effet, W est donnée, la surface S est également connue ou mesurable donc le pouvoir émissif K est déterminé.

Prenons $OM = K = \frac{W}{S}$ et par le point M menons une parallèle à l'axe des abscisses et projetons en A' et B' les points d'intersection de cette ligne avec les courbes (a) et (b). Les distances OA' et OB' mesureront évidemment les températures correspondantes à la même dépense d'énergie W dans chacun des conducteurs.

Remarquons que, à égalité d'énergie dépensée, c'est le corps qui a le pouvoir émissif le plus faible qui atteint la température la plus élevée. On voit immédiatement d'après le nombre donné plus haut que le graphite est supérieur à ce point de vue au charbon noir amorphe.

Mais, de cette énergie totale, une partie seulement est utilisée sous forme d'énergie lumineuse l'autre, et c'est la plus grande, n'apparait que sous forme de chaleur.

Soit L la quantité d'énergie utilisée sous forme de lumière et rayonnant par unité de surface, la quantité totale d'énergie lumineuse sera

$$H = LS$$

Le rapport de l'énergie utilisée LS à l'énergie totale fournie donnera le rendement, nous avons donc

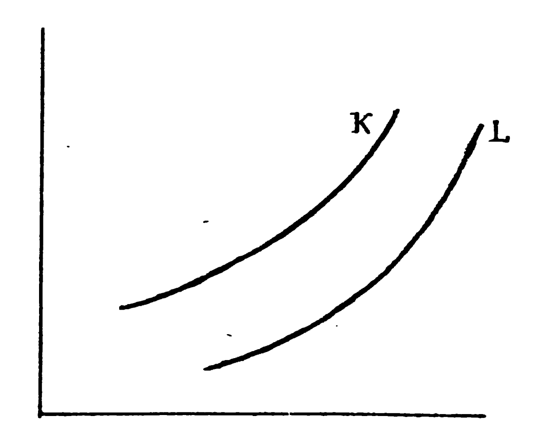
$$\text{Rendement} = \frac{LS}{KS} = \frac{L}{K}$$

Si l'on étudie isolément le terme L on fait les observations suivantes :

1° — Aux températures basses L est nul (le charbon reste obscur) ;

2° — Vers 500°, le filament devient —

rougeâtre (1), L atteint une certaine valeur



et croît plus rapidement que K ; en d'autres termes le rapport $\frac{L}{K}$ ou le rendement s'élève à mesure que la température augmente. Ce résultat nous montre qu'il y a intérêt à élever la température.

---

(1) Si on examine au spectroscope, avec un œil très reposé, la lumière émise par un filament de charbon dont la température s'élève progressivement, on observe que les 1ères radiations perceptibles apparaissent non pas dans le rouge, mais dans le jaune verdâtre, cela tient à la sensibilité très grande de l'œil pour ces radiations (Voir 1ère Leçon)

des corps portés à l'incandescence et par suite à employer des substances de pouvoir émissif aussi faible que possible.

On peut exprimer le même résultat d'une façon différente : nous appellerons dépense spécifique d'une lampe à incandescence le nombre total de watts qu'il faut dépenser dans cette lampe pour produire une bougie, cela posé, soit b le nombre de bougies correspondant à un watt utile le nombre de bougies correspondant à l'énergie totale lumineuse sera :

$$n = bLS$$

Or l'énergie totale est :

$$W = KS$$

par suite le nombre de watts dépensés par bougie ou la dépense spécifique sera :

$$\frac{W}{n} = \frac{KS}{bLS} = \frac{K}{bL}$$

Or, il est visible que ce nombre diminue lorsque la température s'élève.

Ainsi, la dépense spécifique, exprimée en watts par bougie va en diminuant lorsque la tempéra-ture s'élève.

D'autre part, le pouvoir éclairant augmente très rapidement avec la température, ainsi pour

une variation de 1000 à 1200° le pouvoir éclairant varie dans la proportion de 1 à 40.

On voit donc l'intérêt énorme qu'on a d'élever le plus possible la température du corps incandescent. Malheureusement cette haute température, à laquelle on doit atteindre, restreint considérablement le choix des substances à employer.

En effet, le choix des substances fixes est très limité; si l'on emploie des filaments métalliques (platine, fer, etc...,) malgré toutes les précautions, il existera toujours des points faibles qui atteindront une température plus élevée que celle du filament et, comme le point de fusion est très près du point d'incandescence, il s'en suivra une détérioration très rapide des filaments.

Les premiers essais de fabrication de lampes à incandescence avaient d'ailleurs porté sur l'emploi de filaments métalliques, mais on a dû recourir au charbon qui est actuellement le seul corps qui soit pratiquement employé.

Cependant des recherches se poursuivent pour remplacer ce corps; des mélanges d'oxyde de fer et d'oxyde de magnésie ont donné quelques résultats.

Le charbon étant combustible, c'est-à-dire

pouvant se combiner avec l'oxygène de l'air, doit être porté à l'incandescence dans le vide. On n'aurait d'ailleurs aucun avantage à remplacer le vide par un gaz inerte (acide carbonique) parce que la construction serait presque aussi compliquée et le rendement lu-mineux beaucoup moins bon. On peut alors atteindre des températures très élevées, de 1100 à 1300° suivant le professeur Wéber de Zurich, de 1500 à 1800° suivant M. Le Chatelier.

Nous sommes loin des températures de 3 à 4000° trouvées pour l'arc voltaïque; c'est ce qui explique en partie la différence de rendement lumineux des deux systèmes.

Si l'on essaye de pousser une lampe en élevant la température du filament, le pouvoir éclairant augmente dans une grande pro-portion mais le charbon ne tarde pas à se désagréger; il se produit une sorte d'évaporation électrique et l'on constate un dépôt de carbone sur les parois de la lampe.

Cette évaporation n'est pas comparable évidemment à une évaporation ordinaire; c'est un phénomène spécial produit sous l'in-fluence de l'électricité et qui a été étudié par

le physicien anglais Crookes.

Construction des Lampes

La construction des lampes comprend plu-sieurs opérations dont la plus importante est celle de la préparation des filaments.

Il s'agit tout d'abord de déterminer leurs dimensions.

On vient de voir que leur température en fonctionnement est comprise entre 1100 et 1300°; ce sont deux limites assez resserrées; si l'on dépasse 1300° la lampe est rapidement détruite, si l'on reste au-dessous de 1100°, le rendement et l'éclat de la lampe diminuent.

Nous pouvons dire que le fonctionnement normal d'une lampe correspond à une tem-pérature bien déterminée qu'on peut appeler la température normale.

Nous traiterons plusieurs questions se ratta-chant à la détermination des filaments.

1ère Question — Une lampe étant construite, elle doit fonctionner à un voltage parfaitement déterminé.

Soit une lampe à filament circulaire de

rayon r et de longueur l, sa résistance est donnée par la formule

$$R = \frac{\alpha l}{\pi r^2}$$

(α étant le coëfficient de résistance spécifique à la tempéra-ture normale)

L'énergie dépensée dans le filament est :

$$W = \frac{E^2}{R}$$

qui peut s'écrire : $W = \frac{E^2 \pi r^2}{\alpha l}$

Or cette énergie doit égaler :

$$KS$$

S étant la surface latérale du filament soit $2\pi r l$

donc : $$W = \frac{E^2 \pi r^2}{\alpha l} = K 2 \pi r l$$

d'où l'on tire :

$$E^2 = \frac{2 K \alpha l^2}{r} \quad (\alpha)$$

Or les quantités qui entrent dans le second membre sont toutes déterminées (K est le pouvoir émissif absolu à la température normale ; on peut le mesurer sur la courbe de la fig. précédente, α est la résistance spécifique à la même température, r et l sont les dimensions du filament.) Donc le voltage de la lampe est lui-même déterminé et dans des limites très resserrées puisqu'il est proportionnel à la racine

carré du second membre. Un second résultat qui appa-
-raît immédiatement est le suivant :

Le filament d'une lampe étant déterminé, l'intensité lumineuse de cette lampe est elle-même déterminée.

Le nombre de bougies est en effet donné par la formule :

$$n = bLS$$

a température déterminée b et L sont déterminés, S est la surface, donc le pouvoir éclairant est lui-même déterminé.

De ces deux considérations, il résulte la remarque suivante :

Une lampe à incandescence sera caractérisée par son voltage et le nombre de bougies qu'elle fournit en fonctionnement normal.

Les tensions employées sont très variables, mais celles que l'on rencontre le plus généralement sont 100 et 110 volts. L'emploi de ce dernier voltage est justifié par la remarque que les régulateurs à arc, ainsi que nous l'avons vu, fonctionnent à 55 volts ; sur une distribution à 110 volts, on pourra donc placer des régulateurs par deux en tension, en même temps que des lampes à incandescences à 110 volts.

Le voltage le plus élevé qu'on a jusqu'ici employé pratiquement est 200 volts ; ces lampes sont

encore peu répandues. Quant au nombre de bougies fournies, les types sont très variables; ceux de 10 et 16 bougies sont les plus répandus.

Nous pouvons maintenant traiter la question suivante :

2e Question — Quelles sont les dimensions à donner à un filament pour obtenir une intensité donnée sous un voltage également donné ?

Nous tirons d'abord de l'équation (a) donnée précédemment :

$$\frac{l^2}{r} = \frac{E^2}{2K\alpha} \quad (b)$$

Mais cette équation n'est pas suffisante pour déterminer les inconnues l et r, nous aurons une seconde équation en exprimant que la lampe doit fournir une quantité de lumière donnée.

$$n = bLS$$

b étant le nombre de bougies correspondant à 1 watt utile, L la quantité d'énergie utilisée sous forme de lumière par unité de surface S la surface qui égale $2\pi r l$. donc

$$n = bL\,2\pi rl$$

$$\text{ou } rl = \frac{n}{2\pi bL} \quad (c)$$

Les deux équations (b) et (c) permettent de

résoudre la question

Multiplions les deux équations l'une par l'autre il vient :

$$\frac{r l^3}{r} = \frac{n E^2}{4 \pi K b L a}$$

d'où $$l = \sqrt[3]{\frac{n E^2}{4 \pi K b L a}}$$

De l'équation (b) on tire ensuite :

$$r = \frac{l^2 \times 2 K a}{E^2}$$

$$r = \frac{\left(\frac{n E^2}{4 \pi K b L a}\right)^{\frac{2}{3}} \times 2 K a}{E^2}$$

ou de l'équation (c)

$$r = \frac{n}{2 \pi b L \sqrt[3]{\frac{n E^2}{4 \pi K b L a}}}$$

Les quantités K, b et L sont connues avec toute l'exactitude désirable par les expériences de H. F. Wéber. Mais en pratique on n'a jamais recours à une méthode de calcul aussi compliquée. Il est plus prudent de procéder par comparaison. C'est à ce point de vue que nous traiterons la question suivante d'intérêt moins général mais plus pratique (1)

1° Question — Etant donnée une lampe déjà construite,

(1) Nous donnerons d'ailleurs dans la prochaine Leçon une formule pratique pour le calcul de la longueur et de la résistance à donner au filament d'une lampe de E volts et N bougies.

donnant n bougies sous le voltage normal E, com-
-ment doit-on modifier le filament pour avoir une lampe de même voltage mais donnant n' bougies ?

Soit une première lampe dont le filament a pour dimensions l et r, proposons-nous de déterminer les dimensions l' et r' d'une seconde lampe devant fonctionner au même voltage E et fournir une intensité de n' bougies.

Nous avons en premier lieu (équation b)

$$\frac{l^2}{r} = \frac{E^2}{2K\alpha}$$

puis

$$\frac{l'^2}{r'} = \frac{E^2}{2K\alpha}$$

d'où

$$\frac{l^2}{r} = \frac{l'^2}{r'} \qquad (d)$$

En se reportant à l'équation (c) on trouve

$$\frac{rl}{n} = \frac{1}{2\pi b L}$$

et

$$\frac{r'l'}{n'} = \frac{1}{2\pi b L}$$

d'où

$$\frac{rl}{n} = \frac{r'l'}{n'} \qquad (e)$$

Dans les deux équations (d) et (e) les quan-
-tités K et L n'interviennent plus, et l'on pourra par comparaison, construire à coup sûr une

lampe qui donnera les résultats attendus.

La résolution de ces équations nous donne successivement :

$$r' = \frac{r l'^2}{l^2}$$

$$\frac{r l'^3}{l^2 n'} = \frac{r l}{n}$$

$$l'^3 = \frac{r l^3 n'}{n r}$$

$$l' = \left(\frac{n'}{n}\right)^{\frac{1}{3}} l$$

et enfin $l' = \sqrt[3]{\frac{n'}{n}}\, l$

De même on tire :

$$l' = \frac{r l n'}{r' n}$$

par suite

$$\frac{l^2}{r} = \frac{r^2 l^2 n'^2}{r'^3 n^2}$$

d'où

$$r'^3 = \frac{r^3 l^2 n'^2}{l^2 n^2}$$

$$r' = \left(\frac{n'}{n}\right)^{\frac{2}{3}} r$$

et enfin $r' = \sqrt[3]{\frac{n'}{n}}\, r$

La résistance de la nouvelle lampe sera donnée par la formule :

$$R' = \frac{a l'}{\pi r'^2} = \frac{a l \left(\frac{n'}{n}\right)^{\frac{1}{3}}}{\pi r^2 \left(\frac{n'}{n}\right)^{\frac{4}{3}}} = R\left(\frac{n}{n'}\right)$$

Appliquons ces formules à un exemple :

Nous avons établi une lampe de 16 bougies et nous voulons en construire une de 10 bougies.

Il vient successivement :

$$l'_{10} = \sqrt[3]{\frac{10}{16}}\, l_{16} = 0.855\, l_{16}$$

$$r'_{10} = \sqrt[3]{\left(\frac{10}{16}\right)^2}\, r_{16} = 0.731\, r_{16}$$

$$\text{et } R_{10} = \frac{16}{10}\, R_{16} = 1.6\, R_{16}$$

La maison Siemens emploie les relations suivantes :

$$l'_{10} = 0.880\, l_{16}$$

$$r'_{10} = 0.750\, r_{16}$$

$$R'_{10} = 1.57\, R_{16}$$

Ces nombres coïncident donc assez exactement avec ceux de la théorie, la légère différence provient de ce que, en réalité, les lampes de 10 bougies ne fonctionnent pas avec le même éclat que celles de 16.

Nous pouvons compléter la comparaison en prenant une lampe de 25 bougies.

Les formules nous amènent :

$$l'_{25} = 1.161\, l_{16}$$

$$r'_{25} = 1.346\, r_{16}$$

$$R'_{25} = 0.64\, R_{16}$$

La maison Siemens emploie les rapports suivants :

$$l'_{25} = 1.16\, l_{16}$$
$$r'_{25} = 1.35\, r_{16}$$
$$R'_{25} = 0.636\, R_{16}$$

La détermination absolue du filament constitue le gros problème de la fabrication des lampes à incandescence.

Malgré le calcul, il existe encore quelques différences dans le fonctionnement des lampes construites d'une façon uniforme.

Aussi leur fait-on subir à toutes un essai au photomètre qui sert à les classer selon les différences de voltage.

Nous ferons à ce sujet la remarque suivante : Les industriels qui font leur éclairage en fonctionnant à 110 volts par exemple, pourraient facilement réduire la tension de leurs machines et employer des lampes d'un plus faible voltage (95 par exemple) mises au rebut par les fabricants, et livrées par conséquent à meilleur marché. Ajoutons cependant que, grâce au progrès de la fabrication, ce rebut devient de jour en jour moins considérable. Dans un réseau de station centrale,

cette utilisation ne serait pas possible à cause du grand nombre de lampes en fonctionnement.

Quatrième Question — Inversement, connaissant les dimensions du filament d'une lampe de voltage E et donnant n bougies, trouver les dimensions du filament d'une lampe de voltage E' et donnant le même nombre de bougies.

Nous aurons (équation b)

$$\frac{l^2}{r E^2} = \frac{1}{2 K a}$$

$$\frac{l'^2}{r'^2 E'^2} = \frac{1}{2 K a}$$

D'où :

$$\frac{l^2}{r E^2} = \frac{l'^2}{r' E'^2}$$

D'autre part, (équation c)

$$r l = \frac{n}{2 \pi b L}$$

$$r' l' = \frac{n}{2 \pi b L}$$

D'où

$$r l = r' l'$$

On tire de là :

$$l' = l \sqrt[3]{\frac{E'^2}{E^2}}$$

$$r' = r \sqrt[3]{\frac{E^2}{E'^2}}$$

D'où encore :

$$R' = R\left(\frac{E'}{E}\right)^2$$

On aurait pu écrire immédiatement cette dernière équation en remarquant que la quantité de puissance dépensée dans les deux filaments doit être la même.

L'épaisseur d'un filament est moins facile à mesurer que sa longueur et sa résistance ; ce sont donc définitivement ces deux grandeurs que nous conserverons seules dans les formules de transformation.

Nous aurons ainsi :

1° = Transformation d'une lampe de E volts et n bougies en une lampe de E volts de n' bougies :

$$l' = \sqrt[3]{\frac{n'}{n}}\, l \qquad R' = \left(\frac{n}{n'}\right) R$$

2° = Transformation d'une lampe de E volts et n bougies en une lampe de E' volts et n bougies :

$$l' = \sqrt[3]{\left(\frac{E'}{E}\right)^2}\, l \qquad R' = \left(\frac{E'}{E}\right)^2 R$$

3° = Transformation d'une lampe de E volts et n bougies en une lampe de E' volts et n' bougies :

$$l' = \sqrt[3]{\frac{n'}{n}\left(\frac{E'}{E}\right)^2}\, l \qquad R' = \left(\frac{n}{n'}\right)\left(\frac{E'}{E}\right)^2 R$$

Il sera important d'avoir ces relations présentes à l'esprit dans la fabrication des filaments

---

Détails de fabrication des lampes à incandescence

L'opération capitale dans la fabrication des lampes à incandescence, consiste dans la préparation du filament et la partie essentielle dans la préparation de ce dernier réside dans le choix de la matière première.

Nous avons expliqué précédemment que le charbon était jusqu'ici le seul corps capable de donner pratiquement de la lumière par incandes-cence.

Le charbon destiné à former le filament provient de matières bien différentes et l'imagination des inventeurs s'est donné un libre cours, bien que d'une manière générale, ce soit la cellulose qui ait été choisie. La cellulose est une matière assez bien définie qui forme les parois des vaisseaux de tous les végétaux.

Edison, qu'on doit regarder comme le créateur de la première lampe industrielle ou marchande, emploie la cellulose provenant des fibres du bambou du Japon. Swan, que les Anglais considèrent comme le véritable inventeur de la lampe à incandescen-

emploie des fils de coton tressés, traités avant la car-bonisation par de l'acide sulfurique étendu d'eau.

Maxim découpe les filaments à l'emporte-pièce dans du carton Bristol. Lane-Fox emploie des fibres de bouleau ou de chiendent.

Weston et d'autres fabricants obtiennent la cel-lulose d'une façon spéciale. Ils préparent d'abord une sorte de fulmi-coton ou coton-poudre en traitant du papier par un mélange d'acide azotique et d'acide sulfurique; on dissout ensuite le fulmi-coton dans de l'éther et l'on obtient un produit analogue au collodion. On l'étend alors en couche mince sur des plaques et, l'éther étant évaporé, on a des feuilles qu'on peut découper suivant la forme des filaments.

On peut encore obtenir la cellulose en forme de fils, pendant qu'elle est à l'état de pâte, en la faisant passer par pression à travers une filière appropriée représentée ci-contre.

Quel que soit le procédé employé, il faut se débar-rasser de l'acide azotique, pour cela les fils sont traités par l'une des substances suivantes : ammo-niaque, protochlorure de fer, le sulfhydrate d'ammonia-que, sulfocarbonate de soude ou de potasse, sulfocya-nate .. etc...,

Le filament des lampes Gérard est obtenu par un mélange de coke en poudre fine et d'un sirop pour former une pâte qui est passée à la filière.

Dans les lampes Langhans on emploie le coton d'Alsace (DMC) traité par de l'acide sulfurique.

Enfin, dans les lampes Gabriel et Augenault, on emploie de la pâte de papier ou plutôt la pâte de bois servant à la fabrication du papier, que l'on fait dissoudre dans du chlorure de zinc. (1)

Quelle que soit la matière employée il faut la carboniser. Cette opération se fait, suivant les constructeurs, par des procédés différents qui constituent quelquefois des secrets de fabrication.

La carbonisation était autrefois la seule opération que subissait le filament; mais le charbon ainsi obtenu est noir et mat. On la fait suivre maintenant d'une opération appelée nourrissage par laquelle on dépose une couche de graphite blanc et brillant. Le nourrissage s'effectue de diverses façons, propres à chaque fabricant, mais le procédé

(1) Grâce à l'extrême obligeance de Mrs Gabriel et Augenault, nous avons pu faire suivre par nos auditeurs les diverses opérations que comporte leur fabrication, particulièrement soignée, de lampes à incandescence, à l'aide d'échantillons très complets qu'ils ont adressés au Laboratoire d'Electricité, avec un empressement pour lequel nous ne saurions trop les remercier.

le plus général consiste à plonger le filament dans un hydrocarbure gazeux, liquide ou solide, tel que le gaz d'éclairage, le pétrole, les huiles lourdes, la stéarine, la paraffine et à le porter au rouge sous l'action d'un courant.

Cette opération est très importante et procure plusieurs avantages.

En premier lieu, les filaments sont plus homogènes, plus résistants ; on conçoit en effet que si un filament présente une partie faible en a par exemple la chaleur dégagée en cette partie sera plus forte et le dépôt de carbone plus abondant.

a

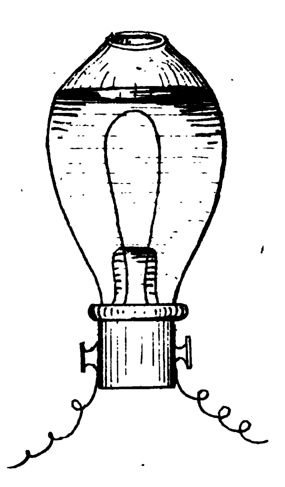
En second lieu, on substitue au charbon noir et mat obtenu par carbonisation, un graphite brillant d'un pouvoir émissif plus faible d'environ 25 %.

Nous avons vu en commençant l'avantage d'une telle substitution : il consiste essentiellement en ce que l'on peut, avec une même dépense de puissance, porter le filament à une température plus élevée.

Ces faits ont été l'objet d'études approfondies de la part de M. H. F. Weber qui a constaté un

rendement lumineux notablement supérieur pour les lampes dont le filament a subi l'opération du nourrissage.

Une expérience qui peut donner une idée assez exacte est la suivante qui a été réalisée au cours.



Une lampe, ouverte à sa partie supérieure, est remplie d'une huile lourde, puis le filament porté à l'incandescence par le passage du courant.

L'huile minérale est décomposée et du carbone se dépose sur le filament (1)

Nous pouvons appliquer maintenant ce que nous avons trouvé plus haut relativement aux dimensions du filament : le filament étant coupé à la longueur calculée, et ayant reçu à dessein une

(1) Dans cette expérience il se produit un phénomène curieux non signalé, à notre connaissance du moins. Le filament étant porté à l'incandescence une 1ère fois en le faisant traverser par un courant qui, dans l'expérience, avait une intensité de 6 ampères ; si à l'aide d'un rhéostat on diminue l'intensité on constate que l'incandescence tout en s'affaiblissant

section <u>trop faible</u>, on mesure de temps en temps sa résistance pendant le nourrissage, et on s'arrête dés que cette résistance a acquis la valeur calculée. Le filament a alors ses dimensions réglementaires

Le filament étant fabriqué il faut ensuite le munir des appendices qui permettront de le placer dans le circuit.

Généralement le filament est continué à chaque extrêmité par deux fils métalliques qui serviront d'intermédiaires entre le filament et les prises de courant et qui, par conséquent, devront franchir le verre de l'ampoule. Cette nécessité amène certaines difficultés imprévues à cause de la diffé-rence des coefficients de dilatation du verre et des métaux. Le seul métal pratiquement employé est le platine dont le coefficient de dilatation diffère peu de celui du verre; malheureusement

---

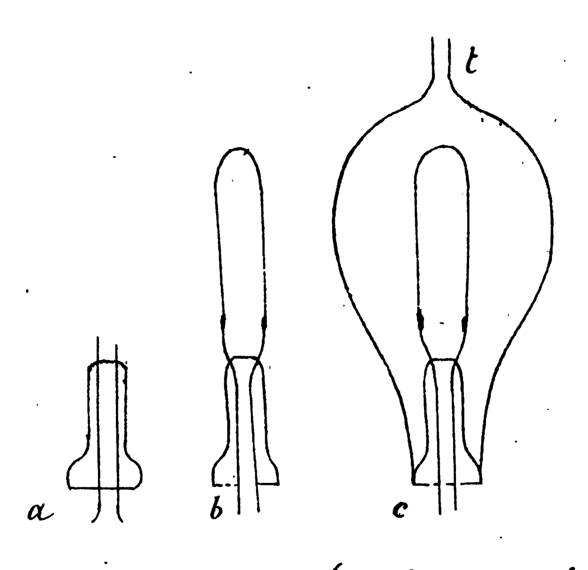
peut-être maintenue indéfiniment à l'aide d'un courant de 4 ampères. Le courant étant alors supprimé, pour ramener la lampe à l'incandescence on doit pousser l'intensité jus-qu'à 6 ampères.

Cette sorte de retard dans l'établissement du régime d'incandescence constitue un fait bizarre qu'il serait intéressant d'éclaircir.

ce métal est d'un prix élevé;

Les fils de platine sont réunis de plusieurs façons au filament de charbon.

Edison, après avoir pincé ce dernier dans le fil de platine recouvre la jonction d'un dépôt de cuivre électrolytique, Lane-Fox dépose une plus grande quantité de charbons et certains fabri-cants emploient un ciment spécial durcissant sous l'action de la chaleur. Les figures ci-contre montrent les phases de l'opération.



En a les fils de platine sont soudés à un tube de verre; en b les fils de platine sont réunis au filament et enfin en c le tube de verre est soudé à l'ampoule. L'ampoule est munie d'un tube t destiné à la réunir à la pompe qui doit produire le vide.

Le vide s'effectue à l'aide de pompes spéciales; la plus généralement employée est la pompe Sprengel. On croit généralement que le vide doit être poussé très loin : c'est à tort. Un vide

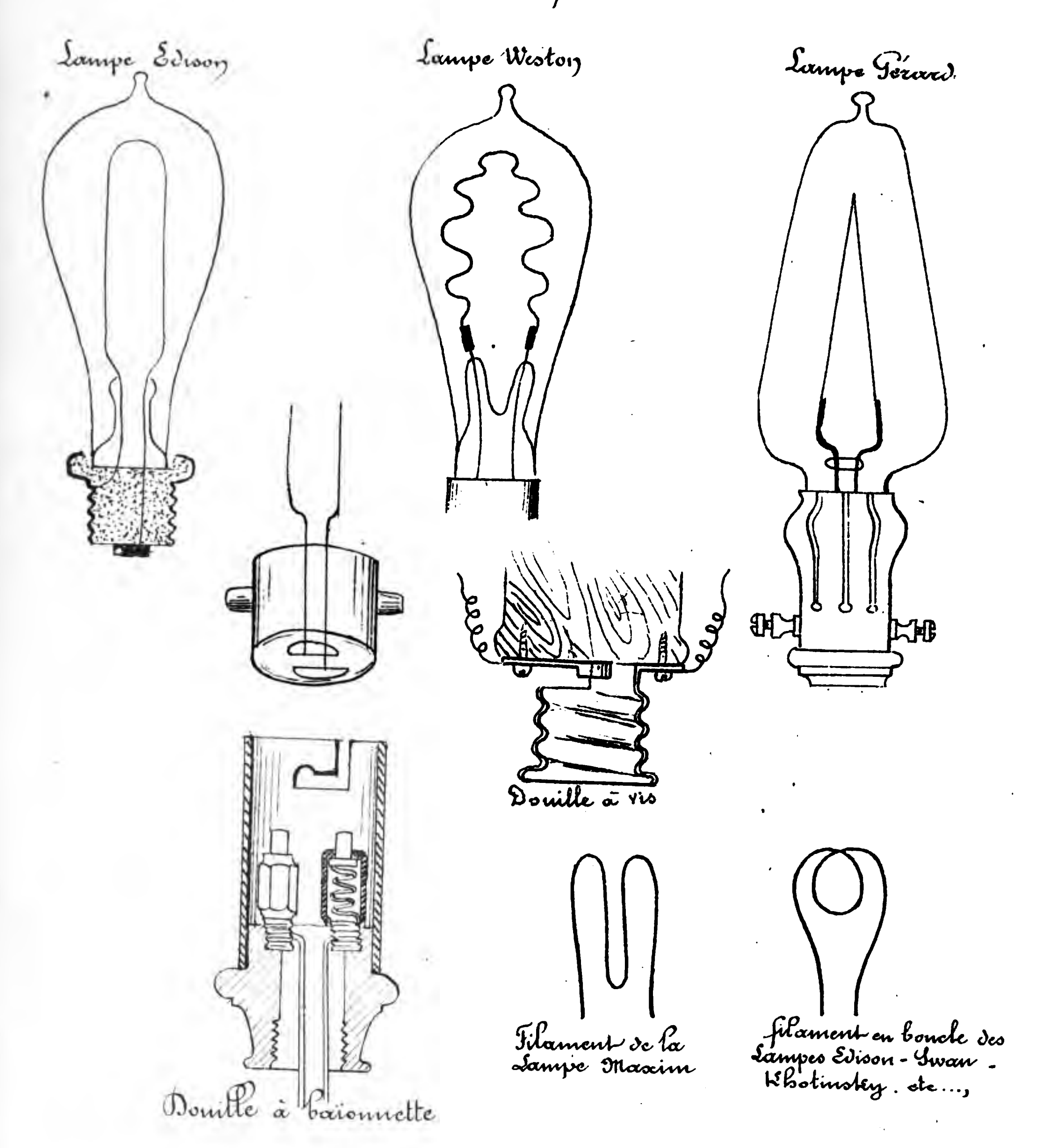
trop parfait entraîne une usure trop rapide de la lampe ; on le pousse habituellement jusqu'à 1/100 de m/m de mercure à froid ; à chaud il est réduit à 1/10.

Lorsque le vide est suffisant, on fait passer un courant, réglé à l'aide d'un rhéostat, et l'on procède ensuite à la fermeture de la lampe. Enfin l'intensité lumineuse et le voltage sont déterminés expérimentalement.

La dernière opération, qui n'a lieu qu'au moment de l'expédition, consiste dans la mise en place de la monture ou douille. Les deux types de douilles les plus employés sont l'ancienne douille Edison qui se visse dans un support formant écrou et la douille plus pratique encore à emmanchement de baïonnette.

En résumé les lampes ne diffèrent guère que par la forme et la constitution du filament ainsi que par la douille de prise de courant.

Les figures ci-après montrent quelques types parmi les plus usuels.



Moyen de reconnaître approximativement le vide dans les lampes à incandescence

Nous savons que les lampes à incandescence dans le vide sont les seules pratiquement employées. Il importe de s'assurer du degré de vide qui

existe dans une lampe. Un premier moyen consiste à briser, sous le mercure, la pointe de la lampe à essayer ; le mercure doit la remplir entièrement : une très petite bulle d'air résiduelle peut seule être tolérée.

Si on ne veut pas sacrifier la lampe, il suffit de la présenter aux bornes d'une bobine de Rhumkorff fonctionnant à un potentiel élevé. Il se produit alors des lueurs variées qui peuvent être un indice. Si la lueur est bleuâtre ou violette et remplit toute la lampe, le degré de raréfaction n'a pas été poussé très loin ; si l'intérieur de la lampe reste obscur, mais que le verre prenne une fluorescence verte, le vide est plus parfait.

L'expérience prouve que le vide ne doit pas être poussé aussi loin que possible : une pression de 1/10 de millimètre de mercure est reconnue avantageuse ainsi que nous l'avons déjà dit.

Un trop grand échauffement d'une lampe, après une heure ou deux de fonctionnement est aussi l'indice d'un mauvais vide.

5e Leçon

Fonctionnement des Lampes à incandescence.

Lorsque une lampe à incandescence travaille on dépense, à un moment donné, une puissance W watts et l'on recueille une puissance lumineuse de N bougies.

Quelles sont les relations qui existent entre ces deux quantités ?

C'est là une question qui peut être abordée par l'expérience car on peut mesurer chacune de ces quantités : la puissance lumineuse N au moyen de procédés photométriques que nous étudierons plus loin et la puissance W au moyen des indications d'un voltmètre et d'un ampèremètre ; cette quantité est donnée par la formule $W = EI$.

Or, si nous faisons varier I et qu'on mesure E, et, N on trouve que N croît très rapidement avec W.

La formule suivante, due à Voit, est très simple et concorde très sensiblement avec les résultats de la pratique :

$$N = q W^3$$

Cette formule a été particulièrement contrôlée par les expériences faites à l'exposition de Munich.

Les valeurs de q sont assez différentes ; voici à ce sujet quelques indications qui résultent des expériences précédentes (1).

Pour une lampe	Edison	de 16	bougies	$q = 37.6 \times 10^{-6}$
—	d°	8	—	$= 110.6 \times 10^{-6}$
—	Swan	de 10	—	$= 84.8 \times 10^{-6}$
—	d°	40	—	$= 9.6 \times 10^{-6}$
—	Maxim	28	—	$= 14.8 \times 10^{-6}$
—	Siemens	16	—	$= 22.5 \times 10^{-6}$
—	Muller	20	—	$= 21.3 \times 10^{-6}$
—	Muller	50	—	$= 6.7 \times 10^{-6}$
—	Muller	100	—	$= 2.1 \times 10^{-6}$
—	Cruto	10	—	$= 25 \times 10^{-6}$

La formule de Voit ne peut s'employer que

(1) Ces nombres supposent que N représente l'intensité horizontale moyenne, et non l'intensité moyenne sphérique (Voir Leçons)

est fixé sur la valeur du coefficient q. On a cherché les causes qui entraînent les variations de ce coefficient et le professeur Wéber de Zurich a montré que l'on a très sensiblement :

$$q = \frac{6.8 \times 10^{-15}}{C^2 S^2}$$

A la formule précédente, on peut donc substituer l'expression générale suivante :

$$N = \frac{6.8 \times 10^{-15}}{C^2 S^2} W^3$$

dans laquelle C est un coefficient qui a pour valeur en moyenne 0,000017 pour les lampes à filaments noirs (non nourris) et 0,000013 pour les lampes à filaments brillants ou nourris.(1)

S est la surface latérale des filaments en cm^2.

Voici quelques vérifications de cette formule, très suffisamment approchée pour la pratique :

Désignation des Lampes	C	S	q observé	q calculé
Wodhouse et Rawson (30 b.)	0.0000169	0.889	32×10^{-6}	$30,1 \times 10^{-6}$
Sunbeam (200 b.)	0.0000131	5.04	1.49	1.56
Allg. El. Ges. Berlin. (16 b.)	0.0000129	0.760	70.4	70.7
Cruto (16 b.)	0.0000171	0.632	55.8	58.2

(1) - Cette différence dans la valeur du coëfficient C n'est pas pour nous surprendre si l'on se rappelle que le nourrissage donne au filament un pouvoir émissif plus faible.

Nous pouvons vérifier l'exactitude de cette formule en l'appliquant à des lampes construites; nous prendrons, par exemple, des lampes Siémens dont les dimensions (diamètre, longueur et surface du filament) sont consignées dans le tableau ci-après :

Nombre de bougies		d	l	s
10	-	0.015	11	0.518
16	-	0.020	12.5	0.785
25	-	0.027	14.5	1.230

Sachant que la lampe Siémens est une lampe à filament nourri on appliquera le coefficient C = 0.000013 et l'on déduira de la formule précédente la valeur

$$d = \frac{W}{N}$$

de la dépense en watts par bougie que nous appellerons dorénavant dépense spécifique.

On trouve ainsi pour les types de lampe Siémens indiqués plus haut.

4.16 - 3.91 et 3.92

ce qui correspond bien à la dépense habituelle de ces lampes.

Voici le calcul :

De la formule de Voit modifiée par Wéber

nous tirons :

$$W = \sqrt[3]{\frac{C^2 \quad S^2 N}{6.8 \times 10^{-15}}}$$

appliqué à la lampe Siemens de 10 bougies pour laquelle on a :

$$N = 10 \ , \ S = 0.518 \quad C = 0.000013 \ ,$$

on trouve, tout calcul fait,

$$W = 40.6 \text{ watts}$$

c'est-à-dire 4.06 watts par bougie, ce qui est une dépense normale.

Les deux autres nombres ont été calculés de même.

Inversement, on pourrait chercher l'intensité lumineuse donnée par la première lampe avec une dépense de 40 watts on aurait :

$$N = \frac{6.8 \times 10^{-15}}{0.000013^2 \times 0.518^2} \quad 40^3$$

$$N = \frac{6.8 \times 10^{-15} \times 64 \times 10^3}{0.169 \times 10^{-9} \times 0.268}$$

$$N = \frac{435.2 \times 10^{-12}}{0.0452 \times 10^{-9}}$$

$$N = \frac{0.4352}{0.0452} = 9.6 \text{ bougies}$$

De la formule de Voit-Weber, nous pouvons tirer une conséquence intéressante relative à la

température du filament.

On a :

$$\frac{1}{d} = \frac{N}{W} = 6.8 \times 10^{-15} \times \frac{W^2}{C^2 S^2}$$

Remplaçons W par sa valeur, que nous avons donnée dans la précédente leçon

$$W = J C S T e^{\alpha T}$$

J est l'équivalent mécanique de la petite calorie (J = 4.18 joules, cours de 1ère année)

il vient :

$$\frac{1}{d} = 6,8 \times 10^{-15} J^2 T^2 e^{2\alpha T}$$

Ainsi C et S disparaissent de cette expression; nous arrivons donc à cette conclusion très intéressante: La dépense spécifique d'une lampe à incandescence (mesurée en watts par bougie) est indépendante de la surface et de la nature du filament et ne dépend que de sa température. Nous avons, dans la précédente leçon, donné les valeurs de la fonction $T e^{\alpha T}$; nous pouvons en déduire les valeurs de d. (1)

---

(1) Dans le tableau suivant les puissances lumineuses sont mesurées en bougies anglaises et se rapportent aux moyennes sphériques.

(Voir leçons 7 et 8 sur la photométrie)

Dépense spécifique (watts par bougie)	Température absolue	Dépense spécifique	Température absolue
25.4	1400	6.3	1540
22.9	1410	5.7	1550
20.7	1420	5.2	1560
18.8	1430	4.7	1570
17.0	1440	4.2	1580
15.4	1450	3.8	1590
13.9	1460	3.5	1600
12.6	1470	3.2	1610
11.4	1480	2.9	1620
10.3	1490	2.6	1630
9.4	1500	2.3	1640
8.5	1510	2.1	1650
7.7	1520	1.3	1700
7.0	1530	0.5	1800

Ce tableau est intéressant en ce sens qu'il s'applique à une lampe absolument quelconque, à charbon noir ou à charbon gris (1). Il donne un moyen nouveau d'évaluer les températures

(1) - Et probablement à un corps incandescent quelconque si, comme l'avance H. F. Weber, la constante $\underline{a}$ est égale pour tous les corps à 0.43.

avec une certaine approximation.

Voici quelques évaluations de températures faites à cette manière

Lampe de 16 bougies de l'Allg. El. Ges. de Berlin

d	T°	
	observé	calculé
10.87	1464	1462
8.67	1483	1488
7.07	1503	1506
5.88	1522	1524
4.91	1541	1542
4.18	1557	1560
3.57	1574	1575
3.09	1591	1588
2.71	1607	1602
2.41	1621	1616

Les températures observées ont été déduites de la résistance du filament. On voit que cette méthode d'évaluation des températures donne d'excellents résultats.

La formule de Voit nous permettra maintenant de déterminer comment varie la puissance lumineuse N avec la tension aux bornes de la

lampe.

Reprenons la formule :

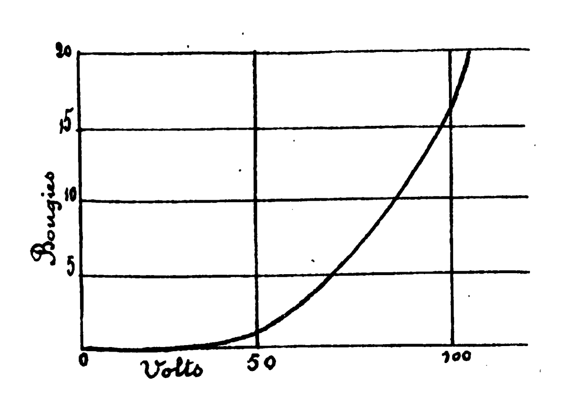
$$N = q W^3$$

et remplaçons W par sa valeur $EI = \frac{E^2}{R}$ il vient :

$$N = q \frac{E^6}{R^3}$$

Lorsqu'on fait croître la tension E aux bornes de la lampe, I croît aussi, de même que la température, tandis que la résistance R du filament diminue, mais si l'on néglige les variations de cette résistance avec la température, c'est-à-dire si l'on suppose R constant, on voit que l'intensité lumineuse d'une lampe est proportionnelle à la 6e puissance de la différence de potentiel mesurée aux bornes de cette lampe.

La courbe ci-dessous obtenue en portant les volts, abscisses et le nombre de bougies en ordonnées est la représentation graphique de cette loi.



Appliquant cette remarque à une lampe donnant 10 bougies à

100 volts on trouve qu'elle donnerait à 200 volts une intensité lumineuse 2^6 soit 64 fois plus grande. Il est inutile d'ajouter que dans ces conditions, la lampe ne durerait que quelques minutes.

Si l'on veut savoir pour quel voltage E' la puissance lumineuse sera doublée, on posera :

$$N' = 2N \text{ et par suite}$$

$$E'^6 = 2E^6$$

$$\text{ou} \quad E'^6 = 2 \times 100^6 = 2 \times 10^{12}$$

$$\text{d'où} \quad E' = \sqrt[6]{2 \times 10^{12}}$$

$$E' = 10^2 \sqrt[6]{2}$$

$$E' = 100 \sqrt{\sqrt{\sqrt{2}}}$$

$$E' = 109 \text{ volts}$$

On voit donc clairement combien une augmentation relativement faible du voltage entraîne une augmentation relativement considérable du pouvoir éclairant ; malheureusement un tel régime est désastreux au point de vue de la durée des lampes.

On voit également par ce qui précède combien l'abaissement du prix de revient de l'éclairage électrique est lui-même lié à l'abaissement de la valeur marchande des lampes. Ces remarques

nous amènent naturellement à traiter la question de l'éclairage au point de vue économique.

Considérations relatives au prix de la lumière.

La question peut se présenter de deux façons différentes :

1°. — Un industriel ayant adopté un type déterminé de lampes au point de vue du voltage se demande s'il a intérêt à forcer l'allure de sa machine pour marcher à un voltage plus élevé ?

Nous avons la formule :

$$N = q W^3$$

de laquelle nous tirons dépense spécifique en watts par bougie

$$d = \frac{W}{N} = \frac{W}{qW^3} = \frac{1}{qW^2}$$

Mais $W = \dfrac{E^2}{R}$

d'où $d = \dfrac{R^2}{qE^4}$

Si R est constant, ainsi que nous l'avons supposé précédemment, la dépense en énergie varie

en raison inverse de la 4e puissance aux bornes, d'où il suit que la dépense en numéraire ou en centimes-heure varie dans le même rapport.

Ainsi, soit P le prix de la bougie-heure pour une différence de potentiel de E volts et P' le prix correspondant à une différence de potentiel de E' volts.

On aura :

$$\frac{P}{P} = \frac{E'^4}{E^4}$$

d'où

$$P = \frac{E^4}{E'^4} \; P$$

Prenons, par exemple, le cas d'une lampe de 100 volts que nous ferons fonctionner à 110 volts, la dépense P' en fonction de P sera

$$P' = \left(\frac{100}{110}\right)^4 P$$

ou

$$P' = 0.68 \; P$$

ce que l'on peut traduire encore en disant que si le carcel-heure à 100 volts vaut 5 cent. à 110 volts il ne vaudra plus que 0.68 × 0.05 = 3,4 cent. ou en d'autres termes qu'une augmentation de 10 volts procure par carcel-heure une économie de 1,6 cent. (sur le prix de l'énergie).

2° — Un abonné d'une station centrale reçoit

le courant sous un potentiel constant E qu'il n'a aucun moyen de modifier, doit-il employer une lampe, de même intensité nominale (en bougies) que celle fournie par la station, mais ayant un voltage nominal E' plus faible que E ?

La question se subdivise de prime abord en deux cas :

Si l'abonnement est traité à forfait, l'abonné n'a pas le droit de changer le type de la lampe qui lui est imposée puisqu'il changerait de ce fait sa consommation en énergie et bénéficierait au détriment de la Société.

Mais si l'abonnement est fait au compteur, en droit l'abonné peut choisir le type de sa lampe, puisqu'il paie sa consommation réelle d'énergie en kilowatt-heures par exemple.

Soit donc un abonné au compteur recevant le courant à une tension E ; S'il se servait d'une lampe dont la tension normale (marquée par le Constructeur) soit E et la résistance R, la dépense de puissance serait :

$$W = \frac{E^2}{R} \quad (1)$$

S'il remplace cette lampe par une autre de résistance R' et à un voltage nominal plus faible E'

la nouvelle dépense sera :

$$W' = \frac{E^2}{R'} \quad (2)$$

Dans le premier cas la dépense spécifique est :

$$d = \frac{W}{N} = \frac{1}{qW^2}$$

Dans le second :

$$d' = \frac{W'}{N'} = \frac{1}{qW'^2}$$

Donc

$$\frac{d}{d'} = \frac{W'^2}{W^2} = \frac{R^2}{R'^2}$$

Mais si les deux lampes fonctionnaient chacune sous leur régime normal, elles absorberaient la même puissance ; donc :

$$\frac{E^2}{R} = \frac{E'^2}{R'}$$

D'où : $\frac{R}{R'} = \frac{E^2}{E'^2}$

et par suite $\frac{d}{d'} = \frac{E^4}{E'^4}$

Ainsi en appelant V le voltage normal indiqué par le constructeur sur une lampe, lorsqu'on branche cette lampe sur un réseau à potentiel constant E, la dépense est sensiblement proportionnelle à V^4.

Le rapport des dépenses est donc, de même que précédemment, comme celui des 4es puissances des tensions nominales marquées sur les lampes.

Si P et P' sont encore les prix en centimes-heure pour des lampes fonctionnant aux voltages E et E' on aura :

$$P' = \left(\frac{E'}{E}\right)^4 P$$

Par suite si, sur un réseau à 110 volts, un abonné au compteur place une lampe de 100 volts la dépense sera :

$$P' = \left(\frac{100}{110}\right)^4 P = 0.68\ P$$

c'est-à-dire que si la lampe à 110 volts coûte 5 centimes le carcel-heure, la lampe à 100 volts ne coûtera que 3,4 centimes.

Les considérations qui précèdent montrent donc qu'on peut amener une lampe à incandescence à avoir une dépense d'énergie fixée d'avance et procurer de ce fait une économie aussi grande que l'on voudra. Toutefois, on doit considérer que la durée de la lampe est d'autant plus faible qu'on lui demande une dépense de puissance également plus faible.

Actuellement on s'en tient à des dépenses

variant de 3 à 4 watts par bougie correspon-dant à une durée d'environ 1000 heures.

Les efforts des constructeurs doivent tendre évidemment à augmenter la durée des lampes tout en diminuant la dépense d'énergie ; on a pu, paraît-il, réaliser des lampes demandant 1 watt 5 par bougie et durant 250 heures ; ce résultat, annoncé par la Société Khotinsky, constitue déjà un progrès sensible.

Durée de la vie d'une Lampe.

La question économique de l'éclairage par incandescence serait relativement très simple si l'intensité lumineuse et si la dépense spécifique ne variaient pas avec le temps. C'est ce cas idéal que nous allons traiter d'abord ; il nous donnera déjà certains renseignements intéressants.

Supposons donc une lampe dans laquelle ces éléments restent fixes mais dont la vie est d'autant plus courte qu'elle est plus poussée. Soit N le nombre de bougies et d la dépense spécifique, la dépense totale est :

$$N d$$

et par heure Nd vatt-heure.

ou $\frac{Nd}{1000}$ kilowatt-heure

Si p est le prix du kilowatt-heure, la dépense par heure sera :

$$\frac{N\,d\,p}{1000}$$

Si cette lampe dure un nombre d'heures égal à H la dépense d'énergie pendant son existence sera :

$$\frac{N\,d\,p\,H}{1000}$$

Mais, quand la lampe est hors de service, on a dépensé en plus le prix d'achat P de la lampe, de sorte que la dépense totale occa-sionnée par cette lampe deviendra :

$$\frac{N\,d\,p\,H}{1000} + P$$

et le prix de la bougie-heure sera :

$$\frac{d\,p}{1000} + \frac{P}{N\,H}$$

C'est ce prix qui intéresse le consommateur.

En examinant l'expression précédente, on reconnait qu'il y aurait intérêt à prendre des lampes de faible dépense spécifique car il

en résulte une diminution du 1er terme, s'il n'en résultait une diminution dans leur durée et, par suite, une augmentation du second terme.

La question qui se présente est donc, en résumé, la suivante :

Quelles sont les conditions qui rendent minimum l'expression $\frac{dp}{1000} + \frac{P}{NH}$?

Pour la traiter, il faut étudier de plus près comment varie, avec la dépense, le nombre d'heures que vit une lampe.

On a trouvé que le nombre d'heures représentant la durée de la vie d'une lampe est sensiblement en raison inverse de la 25e puissance de la tension aux bornes, en sorte que l'on a :

$$H = \frac{m}{E^{25}}$$

Durée d'une Lampe Edison en fonction de la différence de potentiel aux bornes.

Différence de potentiel en volts E	Durée en heures H	HE^{25}
95	3595	9.7×10^{52}
96	2751	9.9
97	2135	10.0
98	1645	9.9

99	1277	9.9×10^{52}
100	1000	10.0
101	785	10.1
102	601	9.9
103	477	10.0
104	375	10.0
105	284	9.6

D'autre part nous avons vu que la dépense spécifique d est en raison inverse de la 4e puissance de la tension aux bornes.

$$d = \frac{K'}{E^4}$$

On en déduit que H est proportionnel à la puissance $\frac{25}{4}$ de la dépense.

$$H = K d^{\frac{25}{4}}$$

La lampe Edison, précédemment étudiée, donnerait les résultats suivants en admettant une dépense de 4 watts lorsque la lampe dure 1000 heures.

Dépense spécifique	Durée
4	1000
3.5	434
3.	166
2.5	50

Ces résultats datent déjà d'il y a quelques années ; la fabrication semble s'être améliorée depuis.

Transportons la valeur $H = Kd^{\frac{25}{4}}$ dans l'expression qu'il s'agit de rendre minimum elle devient :

$$\frac{dp}{1000} + \frac{P}{NKd^{\frac{25}{4}}}$$

Si nous admettons une durée normale de 1000 heures avec une dépense de $4\frac{w}{b}$, K est connu et égal à 0.1726.

D'autre part, en se reportant à la formule de Voit, on trouve facilement :

$$N = \frac{1}{q^{1/2}d^{3/2}}$$

La dépense par bougie-heure devient :

$$b = \frac{pd}{1000} + \frac{P}{K_1 d^{\frac{19}{4}}}$$

en posant :

$$K_1 = \frac{K}{q^{1/2}}$$

Si on admet que la lampe, dans son régime normal, donne 16 bougies avec une dépense de 4 watts par bougie, q est connu

$$q = \frac{1}{16^2 \cdot 4^3}$$

D'où

$$K_1 = 22{,}1$$

Un câlcul facile, que le lecteur reproduira sans peine, permet de trouver la valeur de d qui rend b minimum. Cette valeur est la suivante :

$$d = 2.544 \left(\frac{P}{p}\right)^{\frac{4}{23}}$$

Ainsi lorsque la lampe coûte P francs,[1] il convient d'adopter un régime tel que la dépense spécifique soit de d watts par bougie pour réaliser la plus grande économie possible.

En général, comme nous l'avons observé plus haut, le consommateur reçoit le courant sous une tension fixe E, à laquelle il ne peut rien changer ; mais s'il est abonné au compteur, il peut choisir le type de sa lampe ; nous avons vu plus haut qu'en appelant V le voltage normal indiqué par le constructeur sur la lampe, la dépense est sensiblement proportionnelle à V^4 ; en admettant une dépense normale de 4 watts par bougie lorsque V = E, on a :

$$d = \frac{4}{E^4} \cdot V^4$$

En portant cette valeur dans la formule

(1) et que le Kilowatt-heure coûte p francs.

précédente, nous trouvons pour le meilleur voltage à choisir :

$$V = E \sqrt[4]{\frac{2.544}{4}} \left(\frac{P}{p}\right)^{\frac{1}{23}}$$

Si nous considérons le cas usuel d'une distribution à 110^{v}, nous avons :

$$V = 98.24 \left(\frac{P}{p}\right)^{\frac{1}{23}}$$

C'est cette dernière formule qui intéresse directement le consommateur.

Voici quelques tableaux qui résument dans un cas particulier les calculs précédents : ces tableaux ont été calculés pour une lampe coûtant 2$^{fr.}$ et durant 1000 heures sous le régime de 16 bougies à 4 watts par bougie, sur un réseau à 110^{volts}.

I. Conditions économiques de fonctionnement.

prix du Kilowatt-heure	Dépense spécifique	voltage normal
0^{f}.25	3^{w}.65	107^{v}.4
0.50	3.24	104.3
0.75	3.02	102.5
1.00	2.87	101.2
1.25	2.67	99.5

II — Prix de la lampe-heure de 16 bougies
(non compris les frais de renouvellement)

Prix du kilo-watt-heure en francs	Lampe de 16 bougies consommant par bougie			
	4 watts	3.5	3	2.5
0.25	0.016	0.014	0.012	0.010
0.50	0.032	0.028	0.024	0.020
0.75	0.048	0.042	0.036	0.030
1.00	0.064	0.056	0.048	0.040
1.25	0.080	0.070	0.060	0.050
1.50	0.096	0.084	0.072	0.060

III — Prix de la lampe-heure de 16 bougies
(y compris les frais de renouvellement)

Prix du kilowatt-heure en francs	Lampe de 16 bougies consommant par bougie			
	4 watts	3.5	3	2.5
0.25	0.018	0.018	0.020	0.029
0.50	0.034	0.032	0.032	0.039
0.75	0.050	0.046	0.044	0.049
1.00	0.066	0.060	0.056	0.059
1.25	0.082	0.074	0.068	0.069
1.50	0.098	0.088	0.080	0.079

La discussion qui précède est relativement simple mais elle est insuffisante car, ainsi que nous l'avons dit, la dépense spécifique en watts par bougie varie ; en somme dans une lampe à incandescence tout varie avec le temps

1°— l'intensité lumineuse diminue ;

2°— la dépense spécifique augmente.

Il faut donc tenir compte de ces variations. Or, la question se complique encore si l'on considère une lampe à filament nourri.

Le rendement peut-être très élevé au début et diminuer rapidement si la couche déposée par le nourrissage (ch. gaz) disparait pour faire place au charbon noir.

Nous allons essayer d'esquisser cette étude, mais c'est là, nous le répétons, une question très complexe pour peu qu'on recherche une certaine précision.

En premier lieu, nous observons que l'intensité d'une lampe diminue avec le temps : le tableau ci-après indique cette variation.

Fonctionnement

Fonctionnement des Lampes à incandescence

Heures d'allumage	Intensité lumineuse en bougies	Dépense en watts par bougie
0	16. 43	4.2
100.	13. 58	4.5
200	12. 58	4.8
300	»	5.0
400	10. 87	5.2
500	»	5.6
600	10.34	5.9
700	»	6.3
800	9. 50	6.6
900	»	6.8
1000	9. 38	6.8
1100	»	7.0
1200	»	7.0

La première cause de cette diminution - et probablement aussi la plus importante - provient de ce que le filament s'amincit (fait dû à ce que nous avons appelé l'évaporation électrique) il en résulte une augmentation de la résistance et par suite une diminution de la

puissance dépensée dans le filament. Mais, la surface diminuant en même temps, nous ne pouvons pas savoir quelle variation de température il en résultera : il faut examiner la question de plus près.

Soit W la quantité de puissance dépensée dans une lampe, K la quantité de puissance rayonnante par centimètre carré, S la surface du filament, on a

$$W = KS$$

Construisons la courbe des pouvoirs émissifs, par la méthode indiquée dans la leçon précédente. Il suffit, on se le rappelle, de porter en ordonnées les valeurs de $K = \frac{W}{S}$ et en abscisses les températures

Calculons $\frac{W}{S}$, on a

$$W = \frac{E^2}{R}$$

Or, la résistance est donnée par l'expression :

$$R = \frac{al}{s} = \frac{al}{\pi r^2},$$

d'où :

$$W = \frac{E^2 \pi r^2}{al}$$

La surface du filament étant donnée par

l'expression :

$$S = 2\pi r l$$

l'expression $\frac{W}{S}$ devient :

$$\frac{W}{S} = \frac{E^2 \, \pi r^2}{al \cdot 2\pi r l}$$

ou $\frac{W}{S} = \frac{E^2 r}{2al^2}$

et par suite

$$K = \frac{E^2 r}{2al^2}$$

Au commencement de l'expérience K a une certaine valeur correspondant à une certaine température ; au bout d'un certain temps, r ayant diminué, cette valeur s'est abaissée et a déterminé un abaissement de la température. Il convient de remarquer que cet abaissement est encore plus considérable que ne semble l'indiquer la courbe. En effet, dans les filaments nourris, la couche brillante de carbone déposé diminue par le fait de l'évaporation électrique, et par suite le pouvoir émissif augmente à mesure que cette couche disparait ; sur la fig., la courbe (1) représente le pouvoir émissif de la lampe neuve, la courbe (2) le pouvoir émissif plus grand de la lampe usée.

OD est égal à $\frac{E^2 r}{2al^2}$, r étant le rayon primitif du filament et par suite OA est la température initiale du filament. OE est égal à $\frac{E^2 r'}{2al^2}$, r' étant le rayon final du filament; par suite OB est la température finale du filament si le pouvoir émissif n'a pas changé; OC est la température finale si le pouvoir émissif a augmenté.

Toutes les raisons énumérées plus haut concourent donc à produire un abaissement de la température.

Cet abaissement de température, joint à une diminution de la surface rayonnante, est la première et la plus importante des causes de la diminution de lumière.

Nous pouvons pousser un peu plus loin les calculs en nous reportant à la formule de Voit modifiée :

$$N - \frac{6.8 \times 10^{-15}}{C^2 S^2} W^3 \quad (1)$$

Remplaçant W^3 par sa valeur $\left(\frac{E^2}{R}\right)^3 = \frac{E^6}{R^3}$ il vient :

$$N = \frac{6.8 \times 10^{-15}}{C^2} \quad \frac{E^6}{S^2 R^3}$$

Or $S = 2\pi r l$ ou en substituant à r sa

valeur en fonction de R

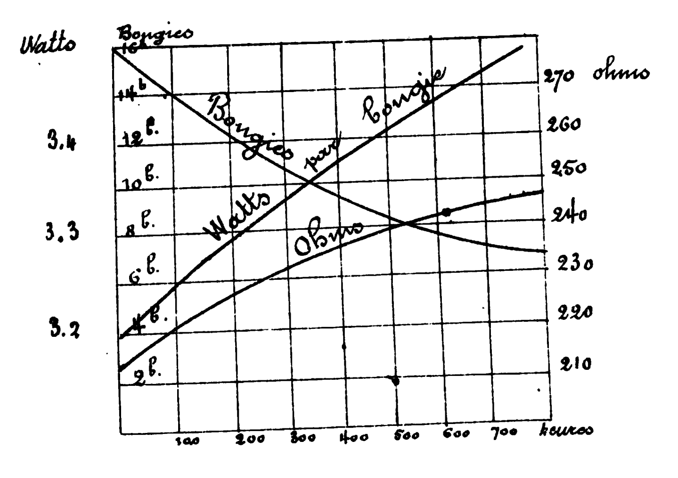
$$S = 2\pi l \sqrt{\frac{al}{\pi R}}$$

$$S^2 = 4\pi^2 l^2 \frac{al}{\pi R}$$

$$S^2 = \frac{4\pi a l^3}{R}$$

et enfin $$N = \frac{6{,}8 \times 10^{-15}}{C^2} \cdot \frac{E^6}{4\pi a l^3 R^2}$$

Cette formule nous montre que si l'amincissement du filament était la seule cause de la diminution de lumière, la puissance lumineuse diminuerait en raison inverse du carré de la résistance. Essayons de vérifier s'il en est ainsi : Les courbes et le tableau suivant donnent des résultats de mesures faites sur les variations de résistance d'une lampe avec le temps



heures	Puissance lumineuse	Résistance	R² N
0	16 bougies	213 ohms	726×10^3
100	12.5	223	622
200	11..	228	572
300	10.	233	543
400	9.2	238	521
500	8.5	240	490
600	7.9	242	463
700	7.5	244	447
800	7.3	246	442

Ce tableau montre qu'en réalité, N diminue plus vite que le carré de la résistance : c'est qu'il y a deux autres causes d'affaiblissement.

1° = augmentation du pouvoir émissif ;

2° = obscurcissement du verre de l'ampoule par dépôt de charbon

1° L'augmentation du pouvoir émissif du filament suffirait déjà à expliquer la diminution reconnue : D'après la formule précédente on doit en effet avoir :

$$C^2 R^2 N = \text{constante}.$$

Or, si l'on admet une valeur initiale de 0,000013 pour C, il suffit d'admettre une

valeur finale de 0.0000166, ce qui est bien dans les limites vraisemblables.

2° La formation du dépôt de charbon sur l'ampoule est encore une cause notable d'affaiblissement, elle est surtout sensible dans les premiers temps de la vie d'une lampe; pour une lampe qui dure 800 heures, plus de la moitié du dépôt se fait dans les 200 premières heures.

La dépense en watts par bougie augmente également car on tire de la formule (1)

$$\frac{1}{d} = \frac{N}{W} = \frac{K}{C^2} \times \frac{W^2}{S^2} = \frac{kE^4}{4\pi a l^3 C^2 R}$$

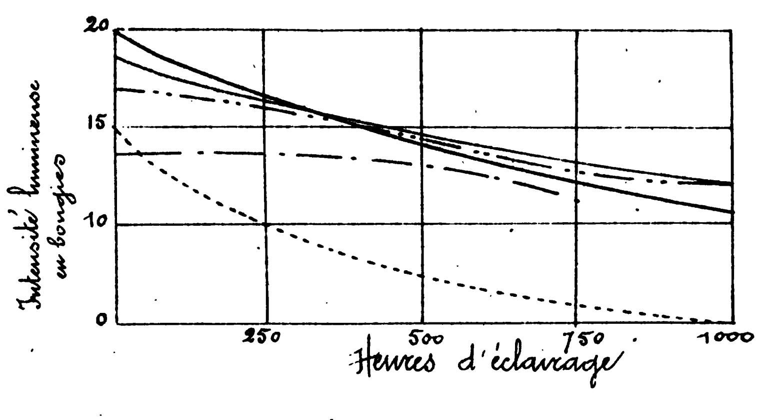
d augmente donc proportionnellement à C^2R (toujours si on néglige l'obscurcissement du globe). C'est ce qu'on reconnait encore très sensiblement dans le tableau précédent.

La résistance R allant en augmentant, on pourrait croire que la dépense va en diminuant. Mais il n'en est rien, car on a établi précédemment une formule qui indique que la valeur N du nombre de bougies va en diminuant avec le fonctionnement. Il n'y a donc pas de ce côté la compensation qu'on pouvait espérer. Il s'en suit que la dépense spécifique augmente bien que le pouvoir éclairant diminue; ce sont ces valeurs

qui sont consignées dans la 3e colonne du tableau de la page 154.

Les courbes suivantes donnent la marche de quelques lampes usuelles.

Courbes de variation de l'intensité lumineuse en bougies avec la durée de l'éclairage.



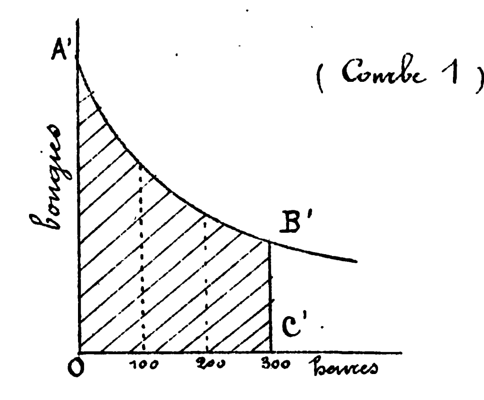
——— Lampe Siemens.
- - - - - - - " la Française
— . — . — . " Gérard
— . . — . . — " Khotinsky
——— " Swan - Edison

De tout ce qui précède nous pouvons tirer quelques conséquences intéressantes relatives à la marche la plus économique des lampes, en considérant cette fois des lampes réelles, dont la puissance lumineuse et la dépense spécifique

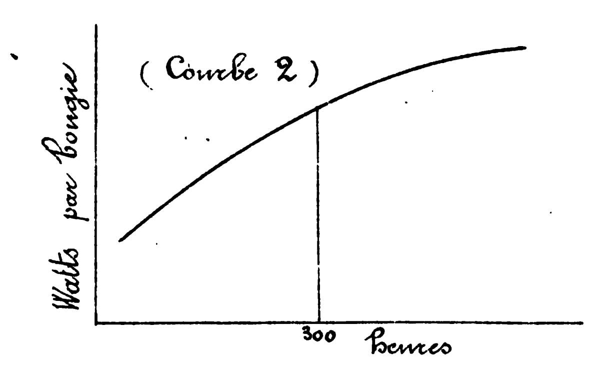
varient avec le temps.

Supposons qu'on ait construit les courbes fondamentales suivantes :

1° — Variation de la puissance lumineuse avec le temps (courbe 1)

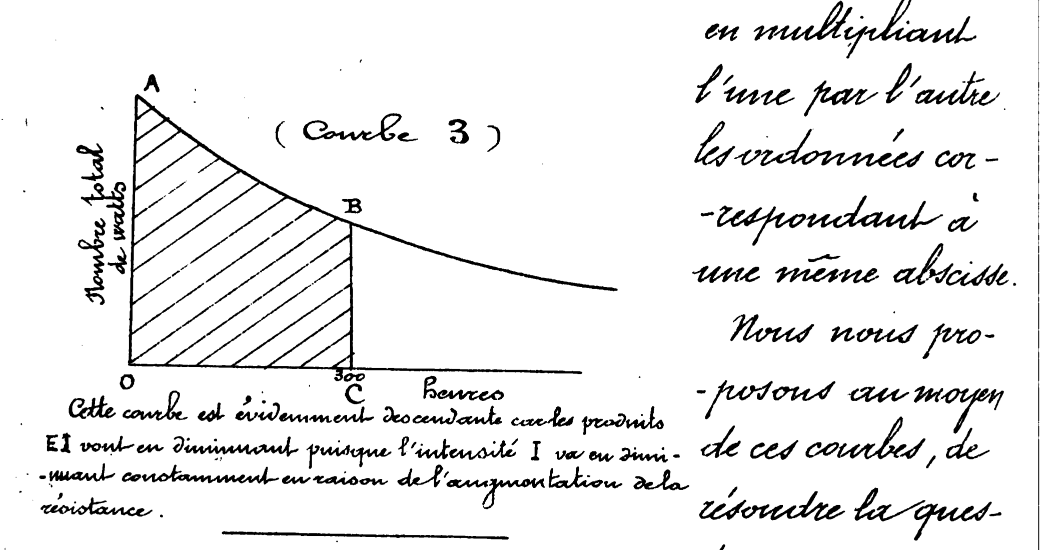


2° — Variation de la dépense spécifique avec le temps (courbe 2)



3° — Variation du nombre total de watts dépensés à chaque instant dans la lampe (courbe 3.). Cette courbe se déduit évidemment des deux précédentes

en multipliant l'une par l'autre les ordonnées correspondant à une même abscisse.



Cette courbe est évidemment descendante car les produits EI vont en diminuant puisque l'intensité I va en diminuant constamment en raison de l'augmentation de la résistance.

Nous nous proposons au moyen de ces courbes, de résoudre la question suivante :

Si nous sacrifions la lampe au bout d'un temps déterminé, 300 heures par exemple, quel est le prix moyen que nous avons payé pour la bougie-heure (1) depuis l'origine jusqu'à cette époque.

Il faut pour cela connaître : . . .

1° — la somme totale qu'on a déboursée à cette époque.

2° — la quantité totale de lumière (mesurée en bougie-heure) qu'on a recueillie.

---

(1) L'expression de bougie-heure se comprend d'elle-même, c'est la quantité de lumière fournie par une bougie brûlant pendant 1 heure. Le prix de la bougie-heure est bien facile à déterminer quand on a affaire à une source dont l'intensité ne varie pas avec le temps ; par exemple si 500 gr. de bougie coûtent 1f.25 (bougie de l'Etoile) et durent 50 heures, le prix de la bougie-heure est $\frac{1.25}{50} = 2.5$ cent.

1° La somme totale déboursée se compose du prix de l'énergie P, et du prix de la lampe P'. La surface OABC (courbe 3) donnera la quantité totale d'énergie consommée ; on en déduira P en connaissant le prix du kilowatt-heure. La dépense totale est alors P + P'.

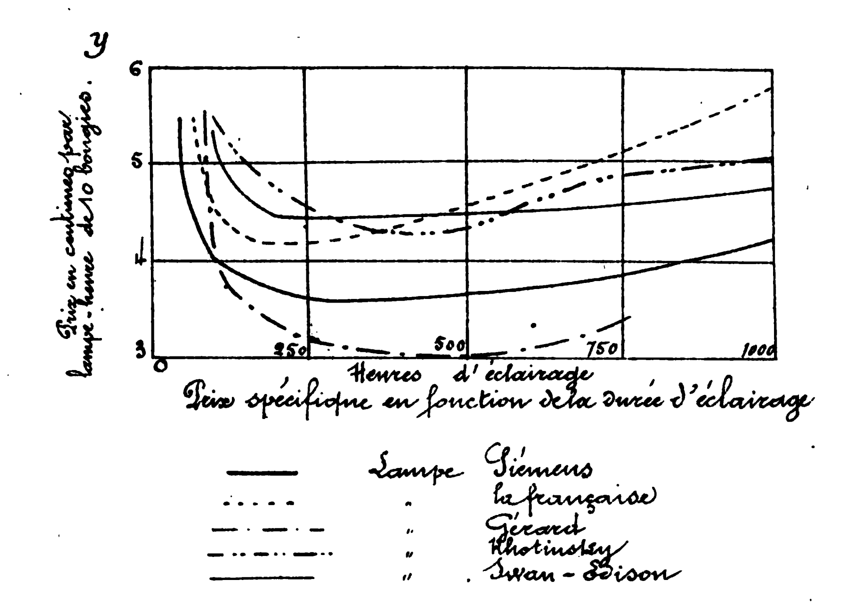
2° La quantité totale de lumière recueillie est représentée par la surface OA'B'O' (courbe 1). Désignons là par Q.

La dépense moyenne par bougie-heure est alors :

$$\frac{P + P'}{Q}$$

Ainsi, à chaque instant, on peut savoir ce que coûte la bougie-heure. En faisant cette observation sur un certain nombre de types de lampes on arrive aux courbes suivantes évidemment asymptotes par rapport à l'axe des y, parce que, à l'origine, on a fait une dépense (prix de la lampe) et qu'on n'a recueilli aucune quantité de lumière : ce qui revient à dire qu'à ce moment le prix de la bougie-heure est infini.

Le point correspondant à l'ordonnée minimum indique l'instant où la dépense a



Prix spécifique en fonction de la durée d'éclairage

atteint son minimum et où, par suite, on a intérêt à casser sa lampe pour la remplacer. Ce minimum correspond à une durée d'éclairage d'environ 250 heures, en tous cas, bien moindre que les 1000 heures de durée normale. La condition la plus favorable serait donc de pousser la lampe de manière à faire coïncider son point de rupture naturel avec le point de cassage que nous venons de déterminer théoriquement. Dans tout autre circonstance, il y a intérêt à la casser à un instant bien déterminé correspondant à la dépense minimum.

Si l'on observe en outre que ces courbes, après avoir passé par un minimum se relèvent indéfi-niment on arrive à cette conclusion curieuse

qu'il existe deux époques dans la vie d'une lampe où la dépense est la même. Par exemple pour la lampe Siemens à 100 heures et à 800 heures cette égalité existe. De sorte que la dépense est la même, soit que l'on casse sa lampe au bout de 100 heures, soit qu'on la laisse durer 800 heures

Un industriel, soucieux de ses intérêts, doit analyser toutes ces circonstances, mais le consommateur ordinaire aura bien de la peine à comprendre que, à un moment donné, son intérêt véritable est de sacrifier une lampe, qui lui paraît encore bonne, pour la remplacer par une lampe neuve. Voici peut-être un aspect de la question plus facile à saisir : l'observateur le moins attentif observe facilement que l'intensité de ses lampes baisse avec le temps ; il doit se dire alors ceci : de deux choses l'une, ou cette quantité de lumière affaiblie me suffit ou elle ne me suffit pas : si elle me suffit, mon intérêt est de changer mon installation et d'y remplacer, par exemple, des lampes de 16 bougies par des lampes de 10 bougies, qui me coûteront moins cher et que je pourrai renouveler plus souvent ; si elle ne me suffit pas, il faut sans hésiter remplacer les lampes vieilles par des neuves dès que le point de cassage théorique

est dépassé.(1)

On voit combien nous avions raison de dire que la question économique du régime des lampes est complexe et quelle étude approfondie elle exige suivant le cas dans lesquels on se trouve placé

---

(1) Voici quelques indications générales sur la durée des lampes, lorsqu'on les arrête à tant % de la lumière primitive

50 %	1000 heures
75 -	450 "
80 -	330 "
90 -	180 "

6e Leçon

—

Chaleur électrique

—

— Travail électrique des métaux —

Nous nous sommes occupé dans les leçons précédentes de l'application à l'éclairage, de la chaleur produite par un courant, soit en utilisant l'arc voltaïque, soit en utilisant l'incandescence d'un conducteur.

Nous consacrerons cette leçon à l'utilisation directe des propriétés calorifiques du courant. Les applications les plus importantes ont été jusqu'à ce jour réalisées en vue du travail à chaud des métaux et principalement de leur soudure. Ces applications, peu développées en Europe et en France, ont pris une certaine extension en Amérique.

Nous devons avant tout nous occuper de la question économique: quel est le prix de

la chaleur électrique ? Y a-t-il, dans certains cas, intérêt à employer l'électricité plutôt que le charbon ou le gaz pour produire de la chaleur ?

Comparaison économique de la chaleur électrique avec les sources usuelles de chaleur.

Rappelons qu'un conducteur parcouru par un cour^t s'échauffe et que la puissance dépensée sous forme de chaleur a pour expression :

EI watts ou joules par seconde

Or, nous savons qu'un joule entièrement transformé en chaleur donne 0.24 calorie (1)

1 watt-seconde, vaut donc 0.24 calorie

1 watt-heure, - 0.24 × 3600

1 Kilowatt-heure, - 0.24 × 3600 × 1000

soit 864.000 calories

Soit P le prix du Kilowatt-heure électrique qui est l'unité habituellement adoptée ; nous ferons le raisonnement suivant :

En dépensant P, on recueille 864.000 calories donc 1 calorie-électricité coûte $\frac{P}{864.000}$.

C'est ce prix que nous comparerons avec celui obtenu à l'aide de sources usuelles de chaleur : le charbon et le gaz par exemple.

(1) Voir premiers principes d'Electricité Industrielle page 27. On a en effet 1 calorie = 0.425 Kgm

Soit P' le prix d'une tonne de charbon, 1 kg. de charbon fournit 7.500.000 calories - 1 tonne fournit donc 7.500.000.000

par suite

1 calorie-charbon coûte $\frac{P'}{7.500.000.000}$

Enfin soit P' le prix du mètre cube de gaz, ou soit qu'un mètre cube dégage 5.600.000 calories par suite

1 calorie-gaz coûte $\frac{P''}{5.600.000}$

Si maintenant nous comparons la calorie obtenue électriquement à la calorie obtenue par la combustion du charbon nous voyons que l'économie de la 1ère sur la seconde sera réalisée à la condition d'avoir :

$$\frac{P}{864000} < \frac{P'}{75 \times 10^8}$$

---

1 Kgm = 9.81 joules

0.425 Kgm = 0.425 × 9.81 = 4.17 joules

par suite 1 calorie = 4.17 joules

d'où 1 joule = $\frac{1}{4.17}$ = 0.24 calorie

c'est-à-dire qu'un Joule converti en chaleur est capable d'élever de 1° la température de 0,24 gr. d'eau.

Si nous prenons du charbon à 30^f la tonne, on arrive à cette condition

$$P < 0.34 \text{ centimes}.$$

Ainsi, pour que l'électricité puisse lutter avec le charbon, il faudrait que le prix du Kilowatt-heure électrique fût inférieur à 0.34 centimes.

Or, nous savons que le prix du Kilowatt-heure est généralement supérieur à ce chiffre ; à Grenoble, en particulier, il atteint 1^f50, c'est-à-dire une valeur 440 fois plus grande.

Le prix le plus bas du Kilowatt-heure électrique que l'on ait atteint est voisin de 34 cent., c'est-à-dire encore 100 fois plus fort que la limite trouvée plus haut.

La comparaison avec le gaz est sensiblement plus avantageuse tout en présentant encore une notable différence.

Admettons 0^f28 pour prix du mètre cube de gaz (1) on aura :

$$\frac{P}{864000} < \frac{P''}{5.600.000} < \frac{28}{5.600.000}$$

soit $P < 4.3$ cent., c'est-à-dire un prix

(1) c'est le prix payé à Grenoble.

encore 35 fois supérieur.

Quant au choix à faire de la source d'électricité, il est évident, à première vue, qu'on n'aura pas intérêt à employer l'électricité provenant d'une dynamo actionnée par une machine à vapeur.

Examinons le cas d'une installation hydraulique qui, seule, peut donner des chances d'économie.

Soit Q le capital immobilisé pour installer 1 Kilowatt utile.

n le nombre de Kilowatts

a le taux de l'intérêt et de l'amortissement.

Si on laisse de côté les frais accessoires, la dépense annuelle est

$$\frac{a n Q}{100}$$

Si N est le nombre d'heures de fonctionnement de l'usine, le nombre de Kilowatts-heure sera :

$$N n$$

et la dépense par Kilowatt-heure sera :

$$\frac{a n Q}{100 N n} = \frac{a Q}{100 N}$$

Pour qu'il y ait économie il faut donc avoir

l'inégalité :

$$\frac{a\,q}{100\,N} < 0.0034 \text{ francs}$$

Supposons un taux d'intérêt et d'amortisse-ment de 20 % et un nombre d'heures annuel de 8760 (ce qui suppose que l'usine fonctionne sans interru-ption) on aura :

$$\frac{20\,q}{876000} < 0.0034 \text{ fr.}$$

ou $q < 150$ fr.

Ainsi, en négligeant tous les frais accessoires, on voit que, pour qu'il y ait intérêt à utiliser la chaleur fournie par l'électricité produite par une station hydrau-lique, il faut que le prix d'installation du Kilowatt-heure soit inférieur à 150 f.

Or, on compte que les dynamos économiques de puissances supérieures sont d'environ 100 f le Kilowatt. Il ne resterait donc que 50 f par Kilo-watt pour l'installation de force motrice (turbines etc...). Ce n'est pas suffisant, mais cependant ce n'est pas non plus si éloigné de la réalité qu'on aurait pu le croire au premier abord.

Ainsi la chaleur électrique ne présente aucun avantage économique ; si donc nous voulons l'utiliser, il faut lui trouver certaines

qualités spéciales ; ces qualités sont de deux espèces : 1° — on peut faire agir la chaleur électrique précisément au point voulu, et par conséquent l'utiliser très bien ; 2° — on peut, au moyen de la chaleur électrique, réaliser les plus hautes températures connues.

Nous passerons rapidement sur le cas où l'énergie est fournie par une station centrale d'éclairage. Il est évident que, dans ce cas, l'énergie électrique est trop chère pour qu'on puisse l'employer au point de vue calorifique (1)

A l'heure actuelle, la soudure des métaux constitue l'application la plus importante de la chaleur électrique. Grâce à elle, on a pu souder tous les métaux à eux mêmes et entr'eux. Par

---

(1) Les stations centrales ont certainement un grand intérêt à voir se développer les applications domestiques de l'électricité, afin d'utiliser plus complètement dans la journée leur matériel électrique ce qui abaisserait les frais généraux.

Une exposition a eu lieu récemment en Angleterre. De nombreux appareils de ce genre figuraient tels que batterie de cuisine électrique, fers à repasser, à friser, bouillotes, allu- -moirs, etc...,

Il y a lieu de remarquer que la différence signalée plus haut entre les 2 modes de production de chaleur est moins grande qu'elle n'apparait de prime-abord, dans le cas particulier qui nous occupe.

En premier lieu le chauffage électrique présente des avan- -tages

les procédés ordinaires, le fer et l'acier sont les seuls qui puissent se souder à eux-mêmes et entr'eux au feu de forge. Pour les autres: cuivre, plomb, zinc, or, argent, etc.., il est nécessaire d'interposer un alliage plus fusible appelé soudure. La soudure d'un métal à lui même est dite autogène. Cette condition est indispensa-ble dans certains cas: réservoirs à acides, boites en plomb pour accumulateurs, etc.., à cause des couples locaux qui se formeraient si la soudure était pratiquée à l'aide d'un alliage.

Les qualités les plus importantes de la chaleur électrique, dans le cas qui nous occupe, sont:

1°. — la grande facilité de régler son inten-sité;

2°. — la possibilité de localiser son action.

Actuellement on emploie deux procédés qui présentent une certaine analogie avec ceux employés dans l'éclairage. Dans les uns

---

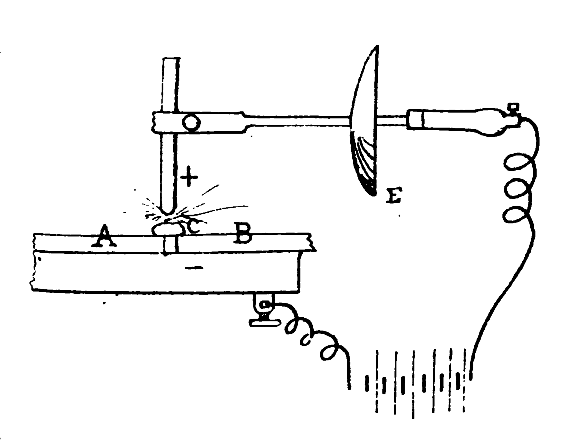
marqués: réglage à volonté, pas de fumée, pas d'odeur, pas de cendre, etc..,

En second lieu, dans le cas de cuisson des aliments, la chaleur électrique serait mieux utilisée que la chaleur du charbon et, tous comptes faits, la différence serait peut être en faveur de l'électricité; il est vrai que la cuisine au gaz est elle-même déjà économique et qu'elle se répand de plus en plus malgré la mauvaise odeur qu'elle dégage.

comme dans les autres, on utilise, soit la chaleur développée par l'arc voltaïque, soit l'élévation de température résultant du passage d'un courant suffisamment intense.

M. M. de Bénardos en Russie et Elihu Thomson en Amérique ont attaché leur nom à ces procédés.

Procédé de Bénardos — Ce procédé est basé sur la chaleur intense développée par l'arc voltaïque. Il consiste à faire jaillir un arc entre les pièces à réunir. On le pratique au moyen d'une sorte de fer à souder analogue, quant à la forme générale, à celui des ferblantiers ; ce fer à souder est muni d'un crayon de charbon en contact avec l'un des pôles d'une puissante source d'électricité. Les pièces à réunir reposent sur une table (enclume électrique) en communication avec l'autre pôle. A l'aide du crayon de charbon on fait jaillir un arc entre les pièces à réunir A et B après avoir interposé entre elles des fragments C de

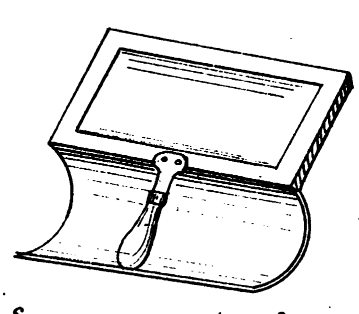


même métal.

Il n'est pas indifférent de réunir le charbon à l'un ou l'autre des pôles de la source. Primiti-vement on réunissait, par raison d'économie, le charbon au pôle − (l'usure étant deux fois moindres pour un charbon − que pour un +) Mais depuis M. de Bénardos a trouvé que l'inverse valait mieux afin de maintenir le métal dans une atmosphère réductrice ou plutôt pour le sous-traire à une atmosphère oxydante.

Dans cette opération les ouvriers ont à se garantir de la chaleur et de la lumière de l'arc qui produisent des ophtalmies et de véritables coups de soleil électriques très douloureux

Dans ce but le porte-charbon est muni d'un écran protecteur E qui garantit la main qui tra-vaille ; de l'autre l'ouvrier tient un écran muni d'un verre coloré (rouge ou violet) qui ga-rantit les yeux.



Ecran pour protéger la vue

Il est évident qu'avec ce système la f.e.m. du

courant employé doit être suffisante pour vaincre la force contre e. m. de l'arc. Quant à l'intensité elle est éminemment variable. Aussi des dynamos supporteraient-elles très mal ces à-coup brusques et l'on est obligé d'employer des batteries d'accu-mulateurs. Les accumulateurs sont réunis à un coupleur qui permet de les grouper selon l'intensité que l'on désire employer.

Pour éviter l'inconvénient de ces variations brus-ques d'intensité on a proposé d'établir dans le circuit de l'arc une self-induction qui, au début, retarde l'établissement du courant et, à la fin, le prolonge (Proposé par Mrs Arnold et Hill).

Les travaux que l'on peut faire par ce pro-cédé sont très variés. On peut souder des barres, des tôles, des fers à T, à cornières.; on peut réparer des pièces de fonte cassées, réparation qui ne s'effec-tuait que par des procédés extrêmement com-pliqués de fonderie et pour des pièces de grande importance. Ce procédé a eu un certain succès en France, à la suite des expériences que fit M. de Bénardos en 1886 à Creil dans le local même qui servit aux expériences de transmission de force entre Creil et Paris.

Une "Société pour le travail électrique des métaux"

fut créée et s'occupa entr'autre de la construction des fûts destinés à transporter les huiles minérales, le sulfure de carbone, etc.., qui, par les procédés ordinaires de fabrication, sont très rarement étanches.

Il existe en ce moment une Société en Angleterre Firme Lloyd and Lloyd, de Combs Wood (Birmingham) s'occupant spécialement de la construction des réservoirs d'air employés pour le frein Westinghouse.

La tôle est d'abord roulée, les extrémités rapprochées puis soudées en promenant l'arc en regard des deux parties. Les fonds emboutis sont également soudés.

Lorsqu'il s'agit de souder deux tôles verticales on peut employer la disposition suivante: Des pinces spéciales à charnière portent de petites cuvettes ou moules en charbon, qu'on peut remonter à volonté et dans lesquels on place des fragments de fer que l'on fond graduellement entre les tôles à réunir.

Les perfectionnements les plus importants ont été apportés à ce procédé par M. Howard. Ils résultent de la nécessité de faire agir l'arc très rapidement. On a construit dans ce but de véritables machines à souder imprimant à l'arc

un mouvement combiné de rotation et de translation. Le charbon décrit un cercle de 40 m/m de diamètre à raison de 300 tours par minute en même temps qu'un mouvement de va-et-vient de 10 c/m à la minute.

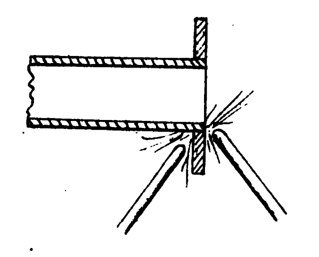
On a étudié la résistance à la rupture des pièces ainsi soudées car il était à craindre qu'une si haute température, atteinte en un temps relativement très court, ne désagrégeât le métal et n'altérât la résistance.

On a ainsi reconnu que l'élasticité pouvait être affaiblie, mais que la résistance de la soudure électrique, opérée dans des conditions normales, était même supérieure à celle obtenue par les procédés de forgeage.

Ainsi une barre de 50m × 5 de section présentait une résistance à la rupture de 32 kg. par m/m² et présentait, par rapport au métal une résistance de 81% alors qu'une soudure faite au feu de forge ne présentait qu'une résistance de 77.9 %.

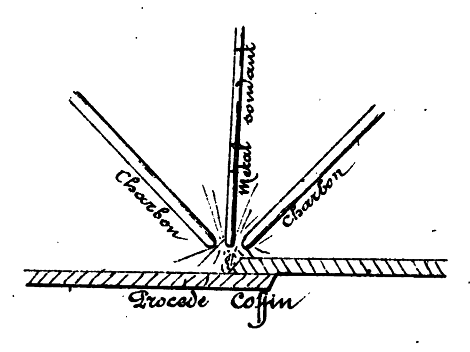
L'arc électrique a pu encore être appliqué à d'autres usages ; tel est le perçage des trous dans la tôle et la mise en place de rivets soudés. Il y a là une application qui pourrait améliorer sérieusement la construction des navires en fer.

L'emploi de l'arc a d'ailleurs été modifié de bien des façons différentes. C'est ainsi qu'à l'usine Howard on emploie quelquefois plusieurs charbons concourant à effectuer la même soudure. S'il s'agit, par exemple, de souder une collerette



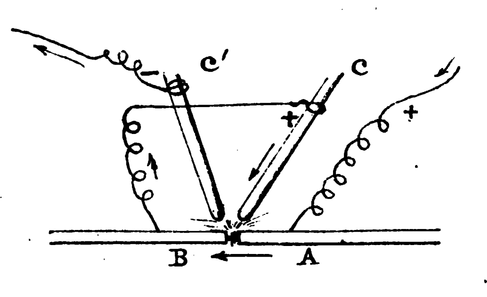
à un tube on peut faire agir, comme ci-dessus un arc de chaque côté de la collerette.

Entre autres variantes, citons encore le procédé Coffin qui consiste à employer 2 baguettes de charbon, entre lesquelles on place une tige du métal soudant



Procédé Coffin

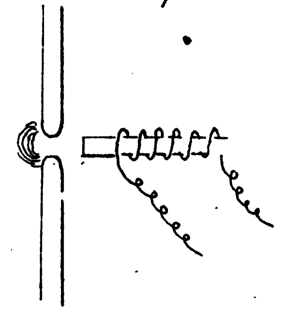
et le procédé ci-dessous qui est une combinaison des procédés de Bénardos et Thomson. Le courant arrivant en A, ressort en B arrive au charbon +C et ressort par le charbon –C'. L'intensité du courant contribue



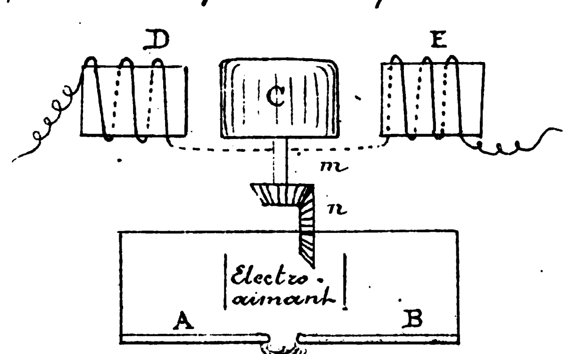
ainsi à chauffer les pièces à souder, entre les points A et B.

Dans les variantes qui précèdent l'arc a été employé sous forme de fer à souder; mais, comme disposition originale, nous pouvons encore citer celles où l'arc est employé à la façon d'un véritable chalumeau.

Dans ce système on profite du pouvoir directeur d'un aimant sur l'arc voltaïque. Si l'on produit un arc et qu'on approche un pôle d'aimant ou d'électro-aimant, on constate que l'arc est soufflé latéralement et présente un véritable dard



susceptible d'être dirigé comme celui d'un chalumeau à courant d'air; de même que dans celui-ci c'est la partie bleue qui est la plus chaude.

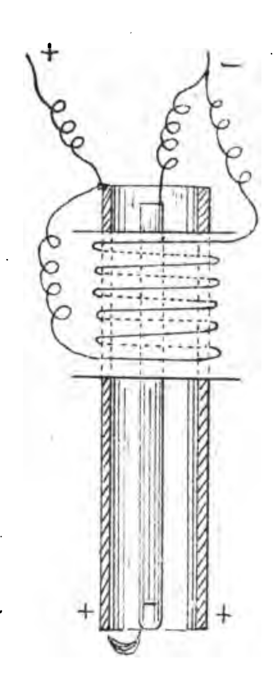


Le chalumeau électrique de Zerener est une application du principe précédent.

Les 2 charbons A et B sont horizontaux

Un anneau C est placé en regard de deux induc-
-teurs D et E l'un à gros fil, l'autre à fil fin. Sur l'arbre de cet anneau est un engrenage d'angle m communiquant le mouvement au porte-charbon et réglant ainsi la longueur de l'arc. Ce système n'est autre chose qu'un régulateur différentiel. L'arc, placé entre les 2 pôles d'un électro-aimant est soufflé vers le bas.

Enfin nous signalerons en dernier lieu le chalumeau à arc tournant de Coffin. L'arc jaillit entre deux charbons : l'un en forme de cylindre creux, l'autre placé au centre du premier. La rotation est obtenue par un système électro-magnétique à l'aide d'une



bobine parcourue par une dérivation du courant et placée sur le charbon tubulaire. Sous l'action de cette bobine, il se produit un véritable soufflage

magnétique et une rotation de l'arc. On a ainsi l'avantage de lécher par l'arc une surface relativement grande et de produire un arc tournant sans aucun mécanisme.

Procédé Elihu Thomson

Dans ce procédé on utilise la chaleur produite par un courant très intense à travers les métaux à réunir. Le soudage est facilité par une pression mécanique obtenue à l'aide de mâchoires spéciales.

On comprend que ce procédé n'est pas d'une application aussi générale que le précédent. Il ne convient guère, en effet, que pour les pièces qu'on doit réunir bout à bout, telles que les tiges, les tubes, etc..., et s'appliquer au fer, à l'acier, au cuivre, au bronze, au maillechort, à l'aluminium, etc... On peut aussi souder des métaux de natures différentes sans qu'on soit obligé de décaper ou d'interposer un fondant; mais il est naturel que les points de contact soient exempts de toute impureté.

Dans ce procédé la f. e. m. employée est très

faible ; moins d'un volt quelquefois ; en revanche l'intensité est très grande et peut dépasser, suivant le cas, des milliers d'ampères.

L'originalité de ce procédé réside surtout dans la façon dont on obtient le courant intense dont on a besoin.

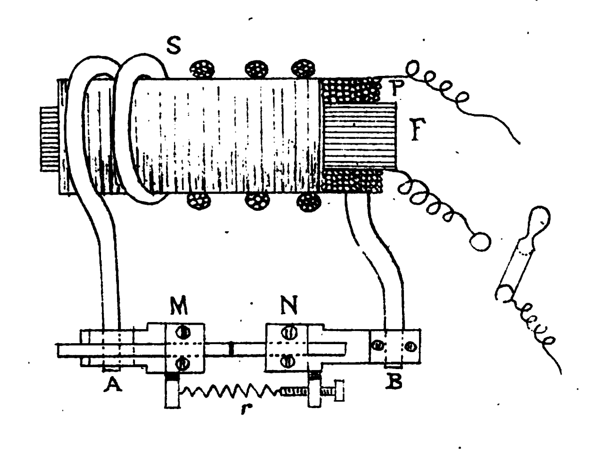
Il existe plusieurs dispositions d'appareils remplissant ce but, mais le principe est le même pour tous.

Il consiste dans l'emploi d'un générateur secondaire ou d'une dynamo-transformateur recevant le courant à haute tension et faible intensité et le transformant en courant de faible tension et de grande intensité.

Avec ce système on est naturellement conduit à employer des courants alternatifs qui se prêtent parfaitement à la transformation.

Les transformateurs sont de formes variées. Un des systèmes les plus simples est représenté par la fig. ci-après.

Une bobine d'induction contenant un faisceau de fils de fer, F, isolés pour éviter les courants de Foucault, porte un enroulement primaire parcouru par le courant de la machine. Le circuit secondaire S est formé de



quelques tours d'un toron de fils de cuivre présentant une grande section et une très faible résistance ($\frac{1}{10000}$ d'Ohm environ).

Les extrémités du circuit secon-daire aboutissent à deux plaques métalliques A et B sur lesquelles sont fixées des mâchoires M et N dans lesquelles on serre les pièces à souder; l'une des mâchoires est mobile longitudinalement et, sous l'action d'un ressort r rapproche fortement les pièces.

Dans une disposition plus récente, le trans-formateur est construit de la façon suivante:

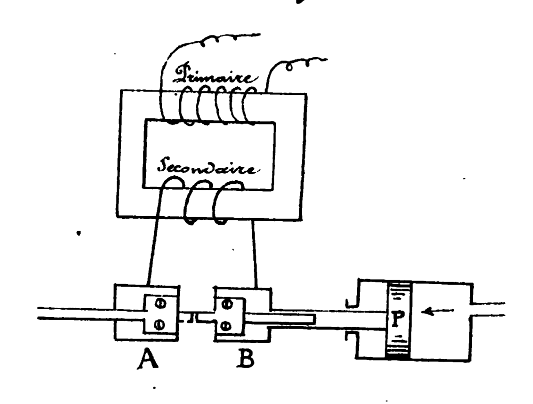
La bobine primaire P est intérieure et en forme d'anneau, la bobine secondaire S est constituée par une forte bague de cuivre ouverte et prolongée par deux tiges réunies aux mâchoires à souder. Le tout est entouré d'un bobinage de fil de fer qui constitue le circuit magnétique. Un courant de 20 ampères et 600 volts dans le primaire, induit

dans le secondaire un courant de 1 volt et 12000 ampères.

Les procédés de serrage sont également variés; outre les systèmes à vis, on emploie le serrage obtenu à l'aide de leviers, de cliquets, de crémaillères, de pistons hydrauliques, etc...,.

La rupture du courant secondaire se produit très facilement à cause de la faible tension du courant, il en résulte un courant induit d'une tension très élevée dans le primaire et qui peut être dangereuse. On y remédie par l'emploi de parafoudres.

Enfin, on a récemment combiné des appareils dans lesquels le serrage des pièces à souder est obtenu au moyen d'un moteur hydraulique.



La disposition schématique est indiquée ci-contre. La machoire B est mobile et reliée à un piston P soumis à une pression hydraulique.

Certains appareils permettent de faire succéder

automatiquement le chauffage à la compression et inversement.

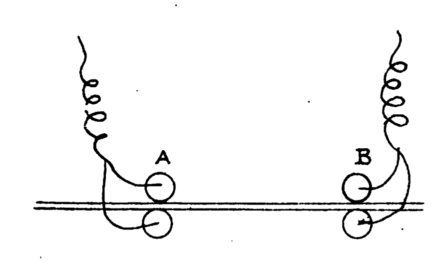
Une des principales applications du procédé Thomson consiste dans la fabrication des chaînes; le procédé électrique se prête très bien en effet à la soudure des maillons.

Le forgeage électrique pratiqué en Amérique par M. M. Angell et Burton a pris une certaine extension. En employant une puissance de 42 chevt pendant 5 minutes et demie on peut porter au rouge une barre de fer de 1 mètre de long et 40 m/m de côté.

Il est à remarquer que, par ce procédé, la chaleur n'est pas uniformément répartie : la barre est beaucoup plus chaude au centre qu'à la surface (le centre peut être près du point de fusion tandis que l'extérieur n'est encore qu'au rouge).

Le bronze et le laiton se travailleraient très bien par ce procédé.

Citons encore l'étampage de certaines pièces à chaud telles que les lames de canifs. Un ruban d'acier est amené entre deux paires de galets A et B servant de prises de courant. Le



ruban rougit entre les galets et peut-être poinçonné ou étampé à chaud. Si la pièce étampée doit être trempée on peut disposer au-dessous un baquet dans lequel la pièce vient tomber et se refroidir.

Le recuit et la trempe des fils d'acier, des ressorts à boudin peut s'effectuer par un procédé analogue.

Quand il s'agit de ressorts à tremper, on peut disposer un électro-aimant parcouru par le courant qui traverse le fil et qui par l'attraction qu'il exerce sur lui détermine la prise de courant; quand le ressort est à la température voulue, on supprime le courant l'électro devient inactif et la pièce tombe dans le baquet de trempe.

A l'exposition de 1889, on avait réuni un grand nombre d'échantillons du travail électrique des métaux, en même temps que les appareils employés par le professeur Thomson pour ce travail particulier.

On remarquait des échantillons de métaux différents soudés entr'eux, d'outils aciérés, rallongés et des barres de fer soudées ayant jusqu'à 5 centimètres de diamètre.

Pour les grosses pièces le courant doit être

de plusieurs milliers d'ampères. Un des appareils à souder comportait un alternateur à excitation séparée pouvant donner 300 volts et 120 ampères alimentant un transformateur pouvant donner jusqu'à 30.000 ampères. On estime à 60 ou 80 chevaux la puissance dépensée pendant la soudure d'une pièce de 50 m/m soudée en une minute. Le transformateur est formé de disques en fer doux de 30 c/m de diamètre extérieur et de 25 c/m intérieurement, le circuit primaire porte 3000 spires, le secondaire est formé d'un tube de cuivre de 112 m/m de diamètre extérieur et 45 m/m de diamètre intérieur.

Voici un tableau indiquant la puissance dépensée et le temps employé pour effectuer des soudures sur des pièces de dimensions déterminées.

Dimensions des Barres	Puissance	Temps
25 m/m diamètre	25 chev.x	45"
25 côté	30 -	48
30 diamètre	35 -	60
30 côté	40 -	70
50 diamètre	75 -	95
50 côté	90 -	100

Dimensions des Bandages	Puissance	Temps
25 m/m × 5 m	11	15
30 × 10	20	25
38 × 10	20	30
38 × 13	20	40
50 × 13	29	55
50 × 20	42	62

Une question d'une importance capitale se posait relativement aux soudures ainsi prati-quées.

Etaient-elles aussi résistantes que celles obtenues par les procédés anciens, et le métal n'était-il pas profondément altéré par le fait d'une température aussi élevée produite en un temps aussi court (1)

Les essais de résistance à la traction ont donné pour le fer des résultats remarquables, de même que pour le cuivre et le laiton, mais pour l'acier ils ont été moins bons.

Très souvent les barres ont cassé à quelques distances de la soudure.

D'après un rapport publié par une commission d'Officiers de la marine américaine (1891)

(1) Il est remarquable en effet de voir l'énorme quantité d'énergie qu'on peut dépenser en un temps aussi court et dans un espace aussi restreint

les résistances des soudures électriques et ordinaires seraient exprimées par les chiffres 0.92 et 0.893 en fonction de la résistance du métal des barres.

Relativement au prix de revient voici quelques chiffres d'origine anglaise.

En une heure on peut faire 24 soudures sur des barres de fer rond de 28 m/m. La dépense de main-d'œuvre est de 0f.06 par soudure celle de force motrice correspondant à une puissance de 12 chevaux serait de 0f.16. La dépense brute par soudure ressortirait ainsi à 0f.22 à laquelle il conviendrait, bien entendu, d'ajouter les frais généraux (intérêt, amortissement, entretien, etc...)

Nous ajouterons pour terminer cette étude sur la soudure électrique que les arsenaux américains l'emploient couramment pour la fabrication des obus et qu'à bord des bâtiments ces procédés pourraient rendre de grands services dans des cas de réparations pressées et urgentes.

— Creuset électrique —

Les expériences récentes de M. H. Moissan pour la production artificielle du diamant ont eu

un grand retentissement. La température obtenue est la plus élevée qui ait été réalisée ; elle n'a d'autres limites que celles indiquées pour l'arc voltaïque lui-même si l'on s'entoure de toutes les précautions nécessaires pour éviter les déperditions. Avec la collaboration de M. Violle, M. Moissan a réalisé des creusets de laboratoire très utiles pour la fusion des métaux réfractaires et les études calorimétriques.

Une forme pratique de cet appareil a été réalisée par MM. Ducretet et Lejeune (1). Le schéma ci-contre indique la disposition générale de l'appareil.

Bouchon
Creuset
Aimants

Creuset Ducretet

Un creuset en matière très réfractaire (plombagine) reçoit deux charbons inclinés à 45°. Ces crayons glissent à frottement doux dans des supports spéciaux et peuvent

---

(1) Un modèle en a été présenté et mis en fonctionnement au cours. Nous rappelons que nous le devons à la générosité des constructeurs que nous sommes heureux de remercier publiquement.

être, à la main, éloignés ou rapprochés. L'appareil est enfermé dans un bloc métallique fermé en avant et en arrière par des lames de mica formant joint. Des tubes latéraux permettent la circulation des gaz ; on peut ainsi opérer dans des atmosphères particulières et étudier les réactions produites.

L'appareil est transformé en un véritable chalumeau par un aimant directeur qui embrasse l'appareil au-dessous des charbons et dirige l'arc sur le creuset.(1)

Il nous reste maintenant à signaler une nouvelle et très curieuse source de chaleur.

Lorsqu'on fait l'électrolyse de l'eau en employant une électrode négative très petite (un fil de platine par ex.) et une électrode positive de surface plus grande (une lame de même métal) on voit apparaître avec une tension de 48 volts une gaîne lumineuse autour de l'électrode négative.

La couleur de la gaîne lumineuse varie selon les métaux employés.

---

(1) M. H. Moissan a pu, à l'aide du creuset électrique, obtenir des fragments de carbone cristallisé analogue au Diamant.

Pour cela il introduit dans du fer en fusion une certaine quantité de carbone, lorsque la température atteint près de 3000° le métal est brusquement refroidi en le plongeant dans l'eau. La contraction ainsi produite détermine la pression qui est nécessaire à la formation des cristaux de carbone.

Si les résultats obtenus ne présentent pas encore un caractère de fabrication pratique, ils n'en constituent pas moins une des plus belles découvertes modernes de la science.

L'énergie dépensée est encore le produit EI ; elle apparait presque tout entière sur la gaîne lumineuse et ce dégagement de chaleur peut porter à l'incandescence la partie métallique plongée dans l'eau. Cette élévation de tempéra-ture, à l'inverse de ce que nous avons signalé pour la soudure Thomson, est toute superficielle l'intérieur de la tige reste froid pour ainsi dire.

Si l'on emploie pour électrode une tige d'acier on a là un moyen de produire, en interrompant le courant, une trempe toute superficielle (Lagrange et Hoh).

Peut-être y a-t-il dans cette expérience une ap-plication importante à prévoir au point de vue de l'outillage ....

Certains outils, représentant une très grande valeur de main-d'œuvre (fraises, etc...), se rom-pent fréquemment à la trempe par suite de l'énorme travail moléculaire interne ; si l'on pouvait obtenir par ce procédé une certaine épaisseur de trempe, qu'on graduerait à volonté, on arriverait à éviter les pertes que représente la rupture d'un outil achevé.

Enfin certaines pièces mécaniques suscep-tibles d'usure par frottement (tourillons, etc...)

pourraient avoir leur surface durcie sans pré-
-senter les dangers de rupture et de déforma-
-tions qu'occasionne une trempe complète. Ce
procédé remplacerait en somme la cémentation
superficielle très répandue dans l'industrie
mécanique.

7e Leçon

— Photométrie —

La photométrie est la partie de la science qui s'occupe de la mesure des quantités de lumière. Dans la photométrie on peut considérer deux divisions : la photométrie théorique et la photométrie pratique.

La première s'occupe des quantités de lumière relativement à la dépense d'énergie correspondante, c'est l'étude que nous avons faite dans les leçons précédentes.

La photométrie pratique s'occupe du résultat obtenu, c'est-à-dire de l'effet utile produit sans s'inquiéter de l'énergie dépensée.

L'effet utile d'une source lumineuse porte le nom vague d'éclairement.

L'éclairement n'est autre chose que cette propriété

spéciale qui fait que l'on peut distinguer les objets, que l'on peut se diriger, que l'on peut lire etc...,

Si l'on pénètre dans une salle on a immédiatement l'impression qu'elle est plus ou moins éclairée, qu'elle est bien ou mal éclairée.

La lecture des caractères d'imprimerie nous donne très nettement l'impression d'un éclairage suffisant ou insuffisant et l'on s'aperçoit bien vite qu'il existe un éclairement minimum au-dessous duquel la lecture ne peut plus se faire, tandis qu'elle est d'autant plus facile que l'éclairement est plus grand.

Cette notion d'éclairement doit être la base de la photométrie pratique. Il importe de voir ce qu'on peut tirer de cette notion un peu vague.

Considérons une feuille de papier blanc formant écran. Divisons au moyen d'une cloison cette feuille en deux parties que nous éclairerons au moyen de deux sources différentes. Quel renseignement l'œil pourra-t-il apporter?

Tout d'abord nous considérerons le cas le plus simple où les deux sources de lumière sont de même nature, c'est-à-dire renferment les mêmes rayons : ce seront par exemple deux

becs de gaz, deux lampes à pétrole, deux lampes à incandescence, etc...,

Les différences d'éclairement des deux parties considérées proviendront de la différence de puissance des sources lumineuses si elles sont toutes deux à la même distance des sources considérées, ou de la différence des distances si les sources sont égales, ou des deux causes réunies.

L'œil nous permettra de juger avec beaucoup d'exactitude, soit l'égalité d'éclairement des deux régions A et B soit, dans le cas contraire, la partie qui est la plus ou la moins éclairée. Mais ce que nous ne pourrons apprécier c'est la valeur relative des deux éclairements; nous ne pourrons, en un mot, dire que telle partie est deux fois, trois fois plus éclairée qu'une autre. Cela n'aurait aucun sens.

Ainsi la seule notion que l'œil nous donne, la seule que nous pourrons utiliser, consiste dans l'impression que nous ressentons que deux surfaces sont également ou inégalement éclairées.

A arc	B gaz

Dans le cas où les sources lumineuses sont de

natures différentes la question se complique. Par exemple, si la région A est éclairée par un arc et B au gaz, il devient à peu près impossible de juger l'égalité d'éclairement des deux plages; l'inégalité elle-même ne s'apprécie alors que très grossièrement. Si nous réglons une 1ère fois les deux sources de façon à ce que l'éclairement soit jugé le même sur les deux parties A et B et que nous recommencions la même expérience quelques instants après, il est fort probable que nous n'obtiendrons pas le même résultat.

L'incertitude est donc très grande, elle est dûe surtout à la différence de coloration des deux lumières.

Toutefois on peut tourner la difficulté. Nous pourrons par exemple définir comme éclairements égaux les éclairements minimum permettant de lire sur les deux moitiés de l'écran des caractères d'imprimerie égaux.

M. Crova, à la suite de longues recherches, a indiqué une autre méthode.

Il a reconnu que si les éclairements produits par deux sources différentes sont égaux, les éclairements produits par les radiations vertes (1)

(1) de longueur d'onde 0μ.582.

de ces deux sources sont aussi égaux. De là, la méthode suivante: sur le trajet des rayons qui produisent les deux éclairements à comparer, on interpose une cuve à faces parallèles de 7 m/m d'épaisseur et contenant une solution verte composée de :

perchlorure de fer : 22.321
chlorure de nickel : 27.191

dissous dans de l'eau de façon à compléter le volume à 100 centimètres cubes.

Cette solution ne laisse passer que les rayons verts et l'on est alors ramené à comparer deux éclairements de même nature.

Pour procéder à la comparaison de deux sources, nous supposerons maintenant que nous sommes en état de juger l'égalité ou l'inégalité d'éclairement de deux surfaces.

Chercher l'intensité lumineuse d'une source consistera à la comparer à une autre prise pour type c'est-à-dire servant d'étalon.

Prenons comme précédemment un écran et adoptons un étalon que nous supposerons être pour l'instant une bougie; nous étudierons plus loin les étalons ordinairement employés.

Si nous plaçons cette bougie à un mètre de

l'écran, ce dernier présentera un certain éclairement qui pourra être pris pour unité. Nous l'appellerons bougie-mètre.

Nous remarquerons avec M. Hospitalier que cette expression est incorrecte. Elle est en effet de la même forme que l'unité de travail le kilogrammètre, mais n'a pas le caractère de précision de cette unité. Ainsi une bougie placée à 1m de distance ne donne pas le même éclairement qu'une demi-bougie placée à 2 mètres, pas plus que deux bougies placées à un ½ mètre.

Sauf cette remarque nous conserverons cette expression :

2 bougies-mètre représenteront l'éclairement produit par 2 bougies à une distance de 1m.

3 bougies-mètre — id — 3 bougies à une distance de 1m.

Nous pourrons maintenant juger de l'égalité de deux sources lumineuses et nous dirons que deux sources sont égales lorsque, placées à la même distance, elles produisent le même éclairement.

La notion d'éclairement est donc fondamentale en photométrie.

Voyons maintenant comment l'éclairement

d'une surface varie avec la distance.

Que donnera par exemple une bougie placée à 50 c/m de distance au lieu d'une bougie placée à 1m? Il suffira pour cela de déterminer expérimentalement le nombre de bougies-mètre obtenu dans chaque cas.

Ainsi l'on trouve que:

1 bougie placée à 1m produit un éclairement de 1 bougie-mètre (définition)
1 — d° — 0.50 — d° — 4 — d° —

d'où nous concluons que l'éclairement a pour expression

$$e = \frac{n}{d^2}$$

n étant le nombre de bougies et d la distance. Ainsi, pour une même source, l'éclairement varie en raison inverse du carré des distances. (1)

Si nous comparons deux sources d'intensités différentes, placées à des distances différentes et produisant le même éclairement on aura:

$$e = \frac{n}{d^2} \qquad e = \frac{n'}{d'^2}$$

d'où

$$\frac{n}{d^2} = \frac{n'}{d'^2}$$

c'est-à-dire que les intensités de deux sources qui

(1) Voir la démonstration de ce principe dans la 1ère Leçon.

produisent le même éclairement sont proportion-
-nelles aux carrés des distances.

Si n' est la source lumineuse inconnue
n la source-étalon, on tire de l'équation précédente :

$$n' = \frac{n d'^2}{d^2}$$

Ceci posé, abordons maintenant la question de la mesure de l'intensité lumineuse et celle de l'étalon.

Quelle source prendrons-nous comme source-étalon ?

Un étalon doit réunir plusieurs qualités :
1° il doit être invariable ;
2° il doit pouvoir se reproduire identiquement à lui-même en un point quelconque de la terre.

Les sources lumineuses usuelles se partagent en deux grandes classes :
les sources à combustion et les sources à incandescence ; c'est dans l'une ou l'autre de ces deux classes que nous aurons à choisir notre étalon. (1) On s'est beaucoup servi des sources

---

(1) Si le soleil ne présentait pas autant de variations d'intensité, résultant des variations atmosphériques, ce serait l'étalon idéal.

à combustion. Le fondateur de la photométrie pratique Bouguet employait des bougies de cire (1728). Mais cet étalon présente de nombreux inconvénients.

En effet la quantité de lumière dépend d'abord de la nature du combustible et il est difficile de se procurer, dans ce cas, un combustible de composition bien uniforme ; en second lieu, la quantité de lumière dépend aussi de la consommation de combustible, c'est-à-dire de la quantité brûlée en l'unité de temps ; enfin elle dépend encore des conditions de température, du milieu dans lequel s'opère la combustion, de la mèche, etc..,

Toutes ces causes indiquent la nécessité d'avoir un étalon plus fixe que ceux à combustion

Les étalons à incandescence vaudraient mieux si l'on pouvait se procurer un corps toujours identique à lui-même.

Les métaux purs sont dans ce cas. La difficulté est de les amener à une température déterminée. Le seul moyen est de prendre un phénomène physique correspondant à une température bien déterminée, tel que la fusion, la solidification, etc..,

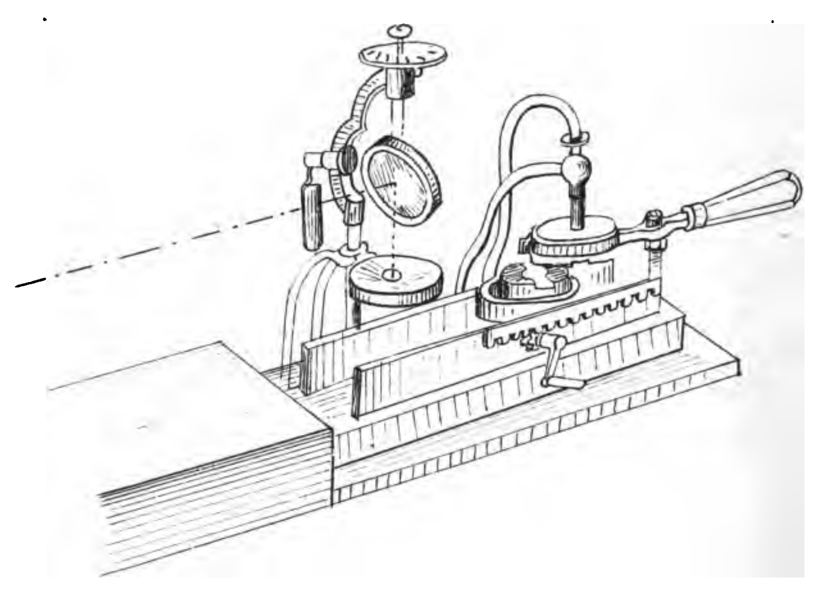
L'étalon, adopté définitivement par le congrès des Electriciens tenu en 1889, est le platine à la

température de solidification. C'est l'étalon qu'a proposé M. Violle à la suite de nombreux travaux photométriques et il a construit un appareil permettant de le réaliser pratiquement.

Cet appareil est combiné de façon à obtenir une surface de platine toujours à la même température de fusion et possédant le même pouvoir émissif.

Il comprend un creuset en chaux, fretté d'un cercle en fer, avec couvercle également en chaux et fretté. Ce couvercle est percé de façon à laisser passer un chalumeau à gaz d'éclairage et oxygène.

Quand le platine est bien fondu, on l'amène



au-dessous d'un écran percé d'une ouverture de

surface déterminée (1 centimètre carré ou un multiple du centimètre carré)

L'appareil est en outre complété par une circulation d'eau froide.

Il existe une période pendant laquelle l'éclat du platine reste constant. On doit profiter de cette constance pour effectuer la comparaison de la source avec l'étalon.

On conçoit que cet appareil soit avant tout un étalon de laboratoire, car il est très coûteux à réaliser:

En premier lieu, pour que l'expérience réussisse, il ne faut pas employer moins d'un Kilog. de platine dont le prix est d'environ 1200f.. Il faut ensuite avoir un réservoir d'oxygène et bien qu'on puisse aujourd'hui se procurer des récipients en acier contenant de l'oxygène comprimé à 150 atmosphères, cela n'en constitue pas moins une sujétion et une dépense.

Cet étalon ne peut donc servir qu'à étalonner des bougies, des brûleurs à gaz ou des lampes à incandescence.

On a dû revenir pour les étalons pratiques aux sources à combustion.

Nous signalerons en premier lieu la lampe Carcel qui, lorsqu'elle est bien construite, ne donne pas des écarts de plus de 3% en plus ou en moins.

La lampe Carcel doit avoir des dimensions bien déterminées résultant de calculs faits par M. Dumas lors de ses travaux en photométrie. La fig. ci-dessous donne ces dimensions.

34

290

47

17

23.5

61

Conditions d'établissement d'une lampe Carcel

Diamètre extérieur du bec	23.5 m/m.
» du courant d'air intérieur ..	17. ..
» » extérieur ..	45.5
Hauteur totale du verre	290. ..
Dist. du coude à la base du verre ..	61. ..
Diam. extérieur au niveau du coude	47. ..
» du verre en haut	34. ..
Épaisseur moyenne du verre	2. ..
Hauteur de la flamme	40. ..

La mèche employée est ronde, c'est d'Argand qui, pour la première fois, a substitué cette mèche à la mèche plate employée avant lui.

La lampe doit être alimentée avec de l'huile de colza très pure ; l'huile doit arriver en grande abondance à la mèche, la flamme doit avoir une hauteur parfaitement déterminée.

En un mot on doit observer un ensemble de prescriptions parfaitement déterminées sous peine d'avoir des résultats faussés. A chaque expérience il faut aussi munir la lampe d'une mèche neuve.

Moyennant ces précautions on peut être certain de quelque exactitude dans les résultats.

On appelle carcel la quantité de lumière fournie par la lampe de ce nom lorsqu'elle consomme 42 grammes d'huile de colza à l'heure.

Il est assez difficile de régler la consommation d'huile. Voici comment on y parvient :

La lampe est montée d'un côté de fléau de balance et l'on règle à peu près son fonctionnement. Puis on équilibre de l'autre côté avec de la grenaille de plomb.

L'équilibre étant établi on ajoute 10 grammes du côté de la lampe ; lorsque 10 grammes d'huile ont été consommés le fléau bascule et l'on en est averti par un coup de timbre. On peut donc con-naître le temps nécessaire à la combustion de

10 grammes ; ce temps est normalement d'environ 14' s'il est plus ou moins grand l'étalon devra être modifié.

On tolère une différence de 4 grammes par heure et l'on admet que dans ces limites la quantité de lumière est sensiblement proportionnelle à la consommation.

Si p est le poids d'huile dépensé on aura la relation :

$$\frac{I}{1} = \frac{p}{42}$$

Pour $p = 45$ on aura par exemple :

$$I' = \frac{45}{42} \text{ de carcel}$$

Des expériences comparatives faites par M. Violle ont donné entre les deux étalons la relation :

Unité Violle 1.000 Carcel 2.08
Carcel 1.000 Unité Violle 0.481

La lampe Carcel, bien que d'un usage plus pratique que l'étalon Violle, demande un temps un peu long et l'on a, dans divers pays, adopté comme étalon la lumière émise horizontalement par une bougie.

Cette unité manque certainement de certitude

car, selon les pays, il peut y avoir des différences assez grandes entre leurs pouvoirs éclairants.

C'est ainsi qu'on distingue la bougie anglaise ou candle de 6 à la livre faite de spermacéti ou blanc de baleine avec une flamme de 44 m/m de longueur; la bougie allemande (Vereinskerze) de paraffine avec une flamme de 50 m/m de longueur (12 au paquet); la bougie française de l'Étoile de 5 ou 6 au paquet donnant une flamme de 52 m/m.

Ces trois sortes de bougies peuvent différer entre elles de plus de 20 %, enfin une même bougie, selon l'état de la mèche ou la hauteur de la flamme, peut présenter des différences de 15 %.

Pour une approximation grossière on peut dire que 8 bougies équivalent à l'unité Carcel.

Le Congrès de 1889 a adopté la bougie-décimale qui vaut le $\frac{1}{20}$ de l'étalon Violle. Comme ce dernier vaut 2.08 Carcel on en conclut que

1 Carcel = 9.8 bougies décimales

Nous citerons encore les étalons suivants:

Valeurs relatives des divers étalons

	Unité Violle	Carcel	Bougie de l'Étoile	Bougie allemande	Bougie anglaise	Lampe Von Hefner-Alteneck
Uni Violle	1.000	2.080	16.1	16.4	18.5	18.9
Carcel	0.481	1.000	7.75	7.89	8.91	9.08
Bougie de l'Étoile	0.062	0.130	1.00	1.02	1.15	1.17
" allemande	0.061	0.127	0.984	1.00	1.13	1.15
" anglaise	0.054	0.112	0.870	0.886	1.00	1.02
Lampe Von Hefner-Alteneck	0.053	0.114	0.853	0.869	0.98	1.00

En Allemagne, la lampe en Acétate d'Amyle proposée par M. Hefner-Alteneck et qui équivaut à peu près à la bougie allemande. Cette lampe, analogue aux lampes à essence, donne une lumière constante mais un peu rouge.

En Angleterre on utilise beaucoup l'étalon Vernon-Harcourt obtenu par les vapeurs de pentane. Il donne une flamme très blanche et une grande constance.

En France on utilise encore l'étalon Girond qui donne de bons résultats

Il comporte deux becs de gaz : un bec-bougie

à un seul trou de 1 m/m et un bec Argand 10 fois plus intense.

L'appareil est réglé de telle sorte que lorsque la flamme du bec-bougie a une longueur de 67 m/m 5, le bec Argand donne une lumière équivalente à 1 carcel.

Lorsque la qualité du gaz varie la flamme du bec-bougie baisse : soit h sa hauteur.

On emploie dans ce cas la formule :

$$I = 0,1 + 0.0022\,(h - 67.5)$$

pour le bec-bougie -

et

$$I = 1 + 0,022\,(h - 67.5)$$

pour le bec Argand.

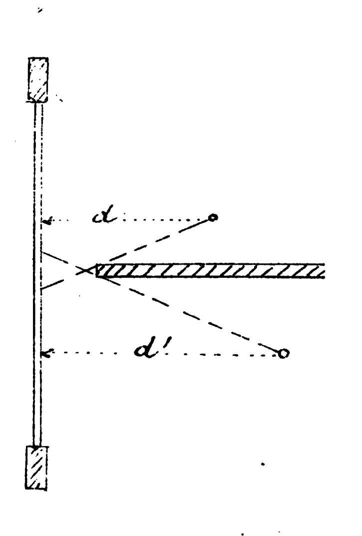
Photomètres

-

Les photomètres sont les appareils servant à effectuer la comparaison des lumières.

Ils se composent essentiellement d'un écran éclairé par les deux sources à comparer ; la disposition de ces appareils est d'ailleurs très variable. Nous n'en décrirons que quelques uns.

Photomètre Foucault — Il se compose d'un écran translucide placé verticalement dans un cadre. En regard est une cloison mobile pouvant se déplacer perpendiculairement à la glace. Le déplacement de cette cloison a pour but d'amener au contact les deux parties éclairées.



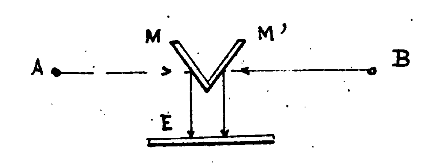
Les lumières sont placées de telle façon que les deux moitiés de l'écran soient également éclairées. Le rapport des sources s'établit ensuite suivant la loi du carré des distances.

Le choix de l'écran a une très grande importance; on prend souvent une glace de verre ordinaire rendu opalescent à l'aide d'une couche bien uniforme d'amidon délayé dans de l'eau.

Par l'évaporation l'amidon reste seul sur le verre.

Les deux sources lumineuses A et B

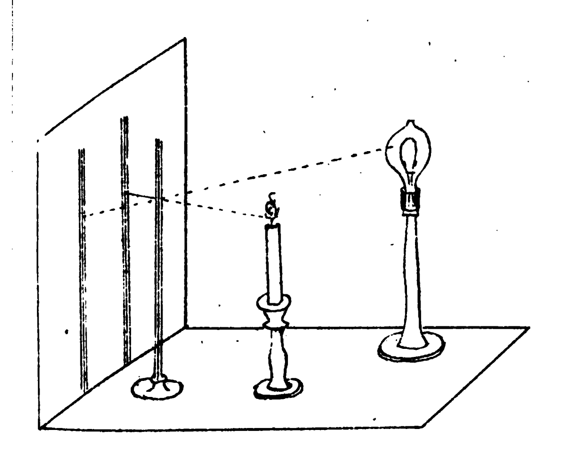
peuvent encore être placées de chaque côté de l'écran ; dans ce cas on emploie deux miroirs à 45°. M et M' pour renvoyer les rayons lumineux sur



l'écran E.

Photomètre Rumfort. — En Angleterre on emploie beaucoup le photomètre Rumfort.

Il se compose d'un écran vertical en papier et d'une baguette cylindrique fixée en avant de l'écran. Les lumières sont placées de façon à être de même hauteur.



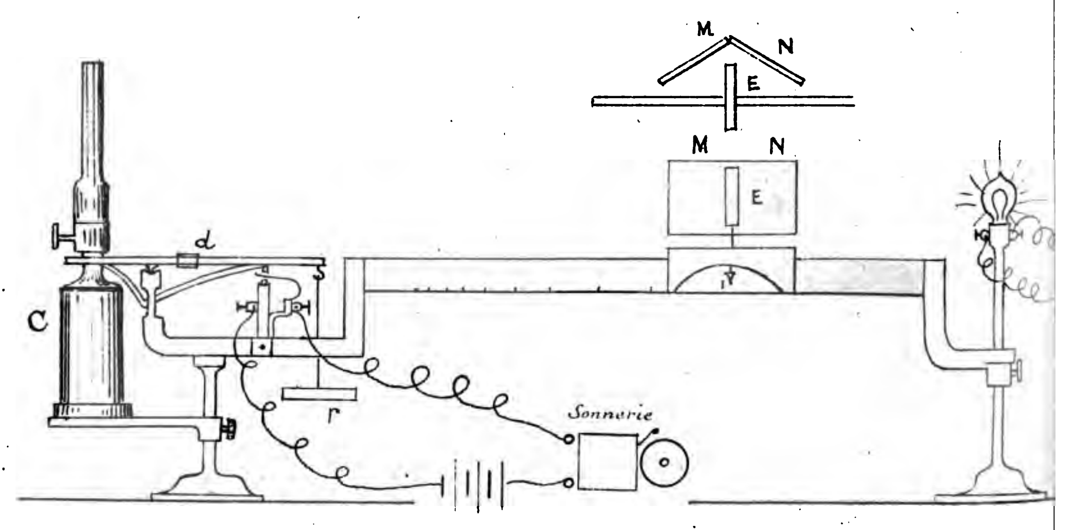
On dispose les choses de telle sorte que les deux ombres soient très près l'une de l'autre.

Quand l'égalité des ombres est obtenue on en déduit l'égalité d'éclairement et par suite le rapport des puissances lumineuses.

Photomètre Bunsen. — En Allemagne on emploie beaucoup le photomètre Bunsen.

Il est basé sur ce principe qu'une tâche d'huile sur une feuille de papier apparait blanche par transparence et foncée par réflexion. La nature du papier et de la tâche ont une certaine importance. Pour avoir une tâche bien circulaire on prend un disque métallique que l'on trempe dans de la paraffine fondue; le disque est ensuite appliqué à chaud sur la feuille de papier.

L'écran est placé à l'intersection de deux miroirs inclinés qui éclairent tous deux la tâche d'huile par réflexion. On règle les distances des sources lumineuses jusqu'à ce que les tâches soient invisibles.



La fig. ci-dessus représente une disposition

très pratique du photomètre Bunsen, appliqué à l'étalonnage des lampes à incandescence.

A l'extrémité gauche est une sorte de balance recevant la lampe Carcel ; à droite est le support recevant la lampe à incandescence.

Le tarage de la source étalon étant obtenu à l'aide de poids p et d'un curseur d on ajoute 10 grammes dans le plateau de la lampe.

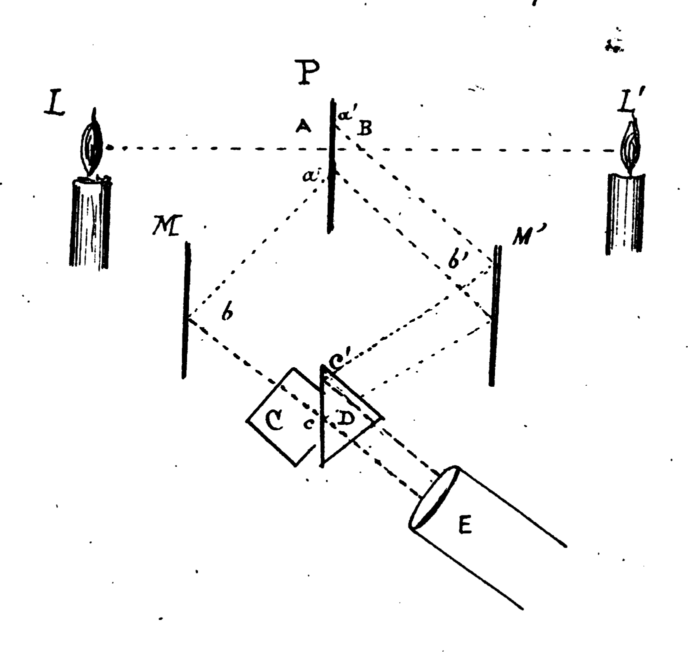
L'écran E est ensuite déplacé le long de la règle graduée jusqu'à ce que l'égalité d'éclairement soit obtenue ; les miroirs m et n en forme de volet permettent facilement cette appréciation.

Quand la lampe Carcel a consommé 10 grmes le fléau bascule et établit un contact électrique qui met en action une sonnerie. La règle est graduée de manière à donner immédiatement en carcels la valeur de l'intensité lumineuse que l'on mesure.

Ecran de Lummer et Brodhun. — Cet appareil a été créé au laboratoire électrotechnique de Berlin ; il est d'une très grande sensibilité par rapport

aux précédents.

Les deux sources à comparer L et L' éclairent les 2 faces identiques A et B d'un écran blanc P. Les rayons diffusés par les 2 faces de cet écran sont reçus sur deux miroirs M et M' qui



les renvoient sur le système optique CD. Ce sys-
-tème est formé de deux prismes de verre ayant la forme indiquée et accolés en partie par leurs faces hypoténuses. Un rayon parti de a, tel que abc, traverse les parties centrales et continue son chemin en ligne droite. Un rayon parti de B tel que a'b'c' se réfléchit sur les parties latérales et est renvoyé parallèlement au rayon bc. De sorte que si on reçoit dans une lunette E tous ces rayons, on observe une plage centrale éclairée par la face A de l'écran et une plage latérale éclairée par la face B. L'opération consis-
-tera

à déplacer l'écran jusqu'à ce que ces deux plages aient la même apparence, ce qui, à cause du contraste pourra se faire avec beaucoup de précision.

Le radiomètre de Crookes peut aussi servir de photomètre. On sait que cet appareil se compose de quatre palettes dont les faces sont alternativement brillantes et noires.

Sous l'action de la lumière les faces noires semblent repoussées et l'appareil se met à tourner. Si les quantités de lumière reçues de chaque côté sont égales l'appareil reste immobile.

Tous les appareils que nous venons d'étudier servent à mesurer l'intensité des sources lumineuses ou à les comparer entr'elles mais aucun ne peut servir à déterminer l'éclairement qui est en réalité l'élément important à connaître en pratique.

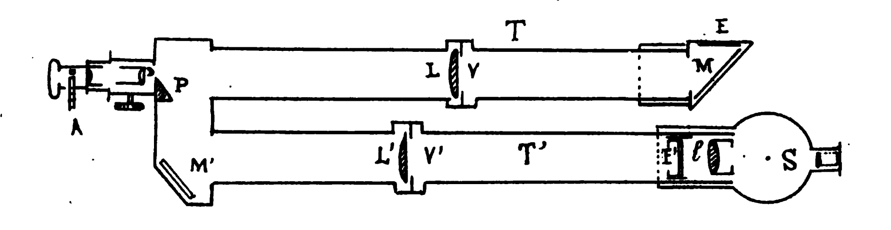
Pour effectuer cette mesure on peut se servir du photomètre de M. Mascart.

Photomètre de M. Mascart. — Ce photomètre, ainsi que nous venons de le dire permet de déterminer

l'éclairement c'est-à-dire la quantité de lumière utilisée à se diriger, à travailler, à lire. On conçoit que cet élément, outre l'intensité et le nombre de foyers, dépende d'une foule de circonstances extérieures telles que la lumière réfléchie par des écrans, diffusée par des murs etc...,

Il existe deux modèles de l'appareil différant par leurs dimensions. L'un, de grande taille, se monte sur un pied et peut s'orienter dans toutes les directions ; l'autre peut se tenir à la main. Ce dernier permet d'effectuer des mesures depuis 0.6 de carcel-mètre jusqu'à 15 carcel-mètre. Pour le grand modèle la lampe de comparaison est une lampe à essence minérale à flamme plate, pour le petit c'est une lampe à essence à mèche ronde.

La figure ci-dessous est une coupe schématique



de l'appareil grand modèle.

Il se compose de deux tubes parallèles T et T'. Le premier reçoit l'éclairage à étudier, le second la lampe de comparaison S.

L'éclairage à étudier est reçu sur un écran E en papier très mince et renvoyé par un miroir M à 45° dans le plan du diaphragme D. Le faisceau lumineux de la lampe S est rendu parallèle par une lentille l tombe sur un écran E' semblable au premier puis est renvoyé dans le plan du diaphragme à l'aide du miroir à 45° M' et du prisme P.

Le diaphragme D est muni d'un verre dépoli avec ouverture centrale. Ce verre est éclairé par les deux sources lumineuses.

Les lentilles L, L' peuvent être plus ou moins cachées à l'aide de volets V et V' qu'on peut manœuvrer de l'extérieur. On vise à l'aide d'une loupe oculaire. Une échelle divisée permet de mesurer le déplacement des volets qui est proportionnel à la surface libre.

Quand l'éclairement est égalisé, c'est du rapport des déplacements qu'on déduit, à l'aide d'une table qui accompagne l'appareil, la valeur de l'éclairement en carcels-mètre.

Un disque A mobile autour d'un point

central porte une ouverture libre et d'autres munies de verres colorés que l'on peut en tournant amener au-devant de l'oculaire.

L'appareil nécessite un étalonnage préalable à l'aide d'une lampe Carcel placé à un mètre et un réétalonnage chaque fois qu'on change le papier formant écran.

Le petit modèle est basé sur le même principe mais au lieu des volets réglables par très petites fractions, on emploie des disques percés de trous dont les surfaces sont dans le rapport des nombres 1 . 1/2 . 1/3 . 1/4 . 1/5 .

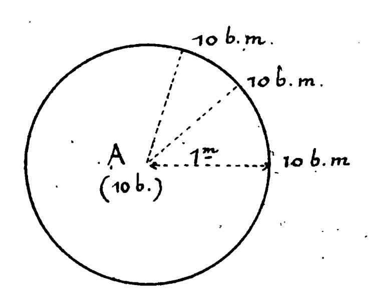
Cet appareil, un peu moins précis que le grand modèle, demande une certaine habitude.

8e Leçon

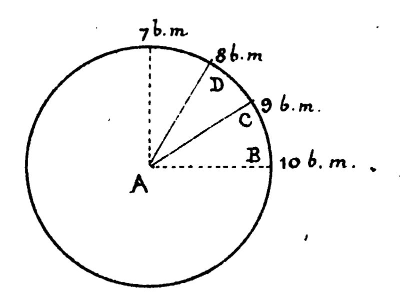
Dans ce qui précède nous avons considéré des sources d'intensité lumineuse uniforme.

Qu'entend-on par <u>source</u> <u>uniforme</u> ?

Soit un foyer lumineux A que nous supposerons être le centre d'une sphère de 1m de rayon. Si en chacun des points de la surface de la sphère l'éclairement est le même, 10 bougies-mètre par exemple, nous dirons que cette source est uniforme et a une intensité de 10 bougies.



Supposons, au contraire, qu'en des points différents de cette surface nous observions des éclairements différents, 10 b-m en B, 9 b-m en C, 8 b-m en D, etc..., nous dirons que

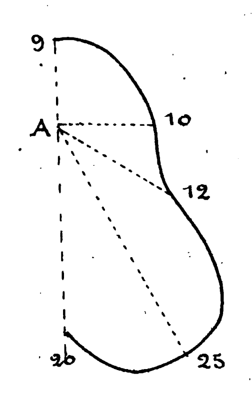


cette source n'est pas uniforme et ; quand on indiquera la valeur de l'éclairement résultant, on devra préciser en indiquant la direction suivant laquelle est mesuré cet éclairement.

Pratiquement les sources lumineuses uniformes n'existent pas et, quelle que soit l'apparence de cette uniformité, si l'on effectue des mesures suivant les différents rayons de la sphère imaginaire on constatera des différences.

Il est possible de représenter graphiquement le fait précédent.

Si, à l'aide d'un photomètre, on fait des mesures à une même distance de la source, mais dans toutes les directions, et qu'on porte suivant ces directions des longrs proportionnelles au nombre représentant l'éclairement on obtiendra, en réunissant les points ainsi déterminés, une surface qui représentera l'intensité de la source estimée



suivant les diverses directions. La surface ainsi obtenue peut être aussi irrégulière que possible.

Les mesures ainsi effectuées dans toutes les directions permettront de déterminer l'intensité moyenne de cette source; elle a reçu le nom d'intensité moyenne sphérique. On peut dire que l'intensité moyenne sphérique n'est autre chose que l'intensité d'une source uniforme qui donnerait la même quantité de lumière que la source considérée.

Il convient encore dans cette étude de considérer les sources qui ont un axe de symétrie et celles qui n'en ont pas.

En général, tous les appareils usuels d'éclairage ont un axe de symétrie: cet axe sera, par exemple, pour un bec de gaz[1], pour une lampe à incandescence, l'axe de l'ampoule de verre, pour une lampe à arc, l'axe des charbons, etc... Mais les sources lumineuses elles-mêmes peuvent être ou n'être pas symétriques autour d'un axe: la lampe Carcel,

[1] l'axe du tube qui amène le gaz.

la bougie, le bec de gaz Bengel, l'arc voltaïque, etc.., sont des sources symétriques; tandis que le bec de gaz papillon, la lampe à incandescence, etc.., sont dissymétriques.

Etudions d'abord les répartitions de la lumière dans un plan perpendiculaire à l'axe de symétrie de l'appareil et passant par la région moyenne de la source. Si la source est symétrique, la question est très simple; la répartition est uniforme si la source est dissymétrique, il faudra aborder la question par l'expérience.

Pour cela nous supposerons que l'axe soit placé verticalement et nous ferons tourner la source lumineuse autour de cet axe pour effectuer les mesures suivant divers azimuts.

On fera des mesures assez rapprochées de 30 en 30° par ex. et l'on déterminera les intensités successives I_0 I_{30} I_{45} I_{60} I_{90} ....

Si l'on prend ensuite la moyenne de ces différentes valeurs on aura l'intensité moyenne horizontale.

Mais ces mesures sont assez laborieuses et l'on a cherché des formules permettant d'en réduire le nombre. La suivante, due à

Hagenbach, donne des résultats satisfaisants.

$$I_{hm} = \frac{I_0 + 2 I_{45} + I_{90}}{4}$$

Mais on peut opérer plus exactement encore en déterminant pour un type de lampe l'intensité horizontale moyenne et on en déduit.

$$I_{hm} = C_0 \; I_0$$

C_0 étant un coefficient invariable pour toutes les lampes du même type ; on aurait de même:

$$I_{hm} = C_1 \; I_{90}$$

$$I_{hm} = C_2 \; I_{45}$$

On peut donc, d'après cela, considérer l'intensité horizontale moyenne comme étant égale à l'intensité horizontale dans une direction multipliée par un coefficient également déterminé.

Le tableau suivant donne des indications relatives à ces valeurs.

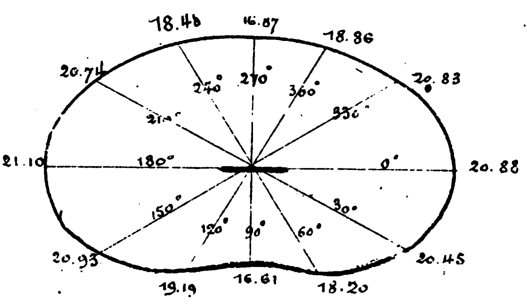
Lampes	C_0	C_1	C	C'
Edison	1.09	1.26	0.87	0.80
Hanley	1.00	0.98	0.83	0.83

Woodhouse et Rawson	0. 88.	1.23	0.74	0. 83
Whit	0. 99	1.02	0. 82	0. 83
Weston	1. 08	0.90	0.98	0. 91

Ainsi l'usage de ce tableau permettra de déterminer l'intensité horizontale moyenne en n'effectuant qu'une seule mesure I_0, par exemple, et en l'affectant du coefficient correspondant.

On trouve que ces intensités horizontales varient assez peu. Il est intéressant de représenter graphiquement le résultat obtenu ; la fig. ci-dessous est la représentation graphique dans le cas d'une lampe Edison. Il y a lieu de remarquer que

Intensité lumineuse dans une Lampe Edison pour les différentes directions du plan horizontal.

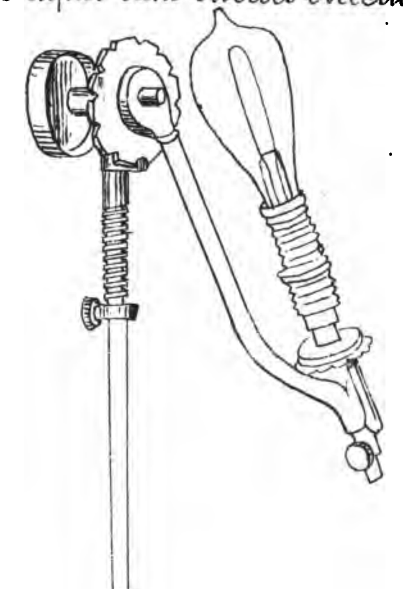


les différences sont un peu exagérées ce qui indique que l'éclairage horizontal est assez régulier.

Pour compléter l'étude nous mesurerons l'intensité dans les différents plans verticaux. Pour qu'il soit possible d'effectuer ces mesures, il convient d'adapter à la lampe un support spécial à rotule lui permettant de prendre diverses inclinaisons.

La fig. ci-dessous représente un des modèles employés.

Support à rotule permettant de faire tourner une lampe autour de deux axes rectangulaires pour effectuer les mesures photométriques dans diverses directions.

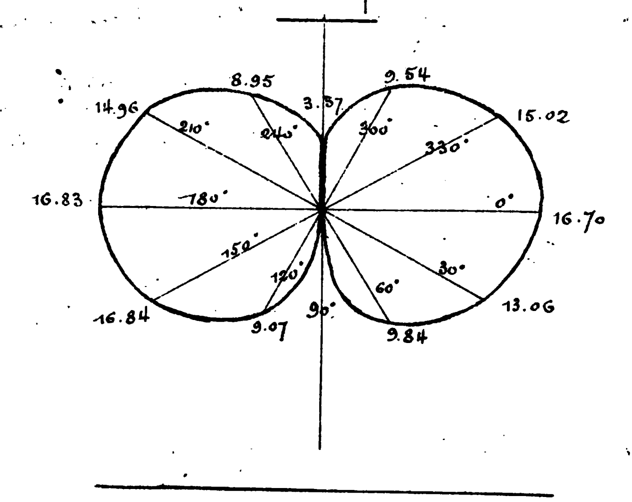


Les deux courbes suivantes donnent les résultats des mesures faites :

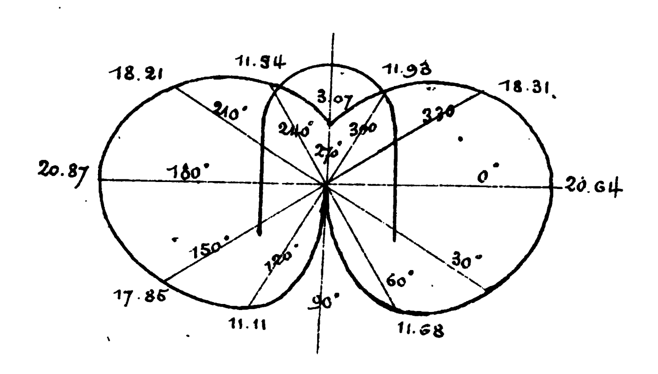
1° — dans le plan du filament ;

2° — dans un plan perpendiculaire au plan du filament.

Intensité lumineuse d'une lampe Edison pour les diverses directions du plan vertical perpendiculaire à celui contenant le filament.



Intensité lumineuse d'une Lampe Edison pour les diverses directions du plan du filament.



Des résultats qui précèdent, on pourra très facilement déduire l'intensité moyenne sphérique. Il suffirait en effet de faire la moyenne de toutes ces observations.

Mais, ici encore, on pourra simplifier et employer pour un type déterminé de lampe

un coefficient particulier et poser

$$I_{sm} = C\, I_o$$

ou en rapportant à l'intensité horizontale moyen

$$I_{sm} = C'\, I_{hm}$$

Cette dernière formule est employée de préférence.

Les valeurs de C et C' sont consignées dans le tableau donné précédemment.

Les considérations qui précèdent montrent combien l'on est mal renseigné, en général, par les seules données des constructeurs. Ces derniers livrent leurs lampes pour un voltage et un nombre de bougies déterminé.

Or s'agit-il de bougies allemandes, anglaises ou Françaises ? S'agit-il d'intensité horizontale moyenne, d'intensité sphérique moyenne ?

Voici, par exemple, une lampe Cruto marquée 100 volts - 16 bougies. Soumise à l'essai photométrique avec un courant de 100,6 volts elle accuse une intensité horizontale moyenne de 15.76 bougies anglaises ou candles. Le nombre indiqué par le constructeur se rapproche donc beaucoup de

l'intensité horizontale moyenne. Mais si l'on veut l'intensité sphérique moyenne, il suffira de multiplier ce nombre par le coefficient C' qui est dans ce cas de 0.8.

On aura donc :

$$I_{sm} = 15.76 \times 0.8 = 12.6 \text{ bougies}$$

Ainsi cette lampe marquée 16[b] ne donne que 12,6 bougies (moyenne sphérique).

En général l'intensité sphérique moyenne est plus petite que l'intensité horizontale moyenne ce qui explique le choix que font les constructeurs de cette dernière pour annoncer l'intensité lumineuse de leurs lampes.

La notion de l'intensité sphérique moyenne est très importante dans le cas où il s'agit d'éclairer des locaux fermés, car ce qu'on veut éclairer alors c'est surtout un certain volume, une certaine capacité; il n'en serait pas tout à fait de même si l'on devait éclairer des surfaces telles que les rues, les cours, les halles, etc...,

Les considérations qui précèdent s'appliquent aux lampes à arc. Ces dernières admettent en effet un axe de symétrie. Si les charbons sont exactement centrés, la lumière émise de part et

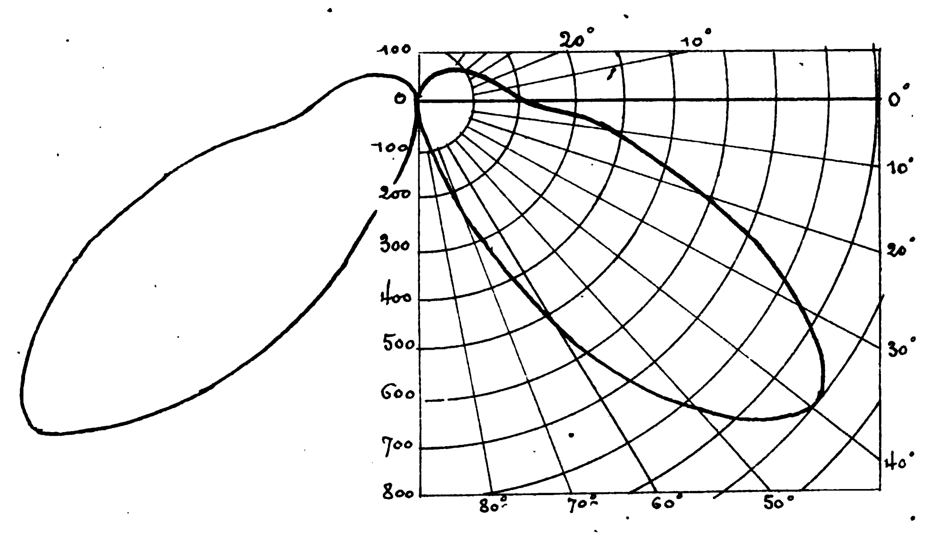
d'autre, autour de cet axe sera absolument la même. Mais cette condition est rarement remplie et l'on ne trouve jamais cette symétrie parfaite. Toutefois les résultats diffèrent assez peu pour qu'on les considère comme semblables dans la pratique, et l'intensité horizontale sera représentée par une circonférence.

Enfin il est encore une distinction très importante à faire entre les arcs obtenus par courants continus et les arcs obtenus par courants alternatifs.

Nous avons expliqué dans la 2e Leçon l'habitude qu'on a de placer, dans le cas de c.t cont.u, le charbon + à la partie supérieure pour utiliser le pouvoir réflecteur du cratère. Il est facile de prévoir que ces arcs conviennent mieux que ceux à courants alternatifs pour l'éclairage des surfaces découvertes.

La fig. ci-après montre nettement cette particularité.

Remarquons que la partie au-dessous de l'horizontale est éclairée par le charbon − tandis que celle qui est au-dessous est éclairée par le +; aussi la différence des deux éclairements est elle énorme.



Variation de l'intensité d'une Lampe à arc (courants continus) avec l'inclinaison

---

A partir de l'intensité horizontale que nous désignerons par H, l'intensité croît d'une façon continue jusqu'à 45° où elle atteint son maximum. Nous désignerons cette valeur par M. A partir de ce point l'intensité diminue par suite de l'ombre portée par le charbon —.

En raison même de l'usage auquel les lampes à arc sont destinées, on conçoit que ce n'est pas l'intensité sphérique moyenne qui importe mais bien l'intensité maximum M dirigée vers le bas.

L'intensité sphérique moyenne peut toutefois être utile à connaître en vue de la détermination du rendement lumineux et cela d'autant

plus facilement qu'on peut avoir sa valeur d'une façon très approchée par la formule suivante :

$$I_{sm} = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}$$

que l'on peut mettre sous la forme :

$$I_{sm} = \frac{H}{4} + \frac{H + M}{4}$$

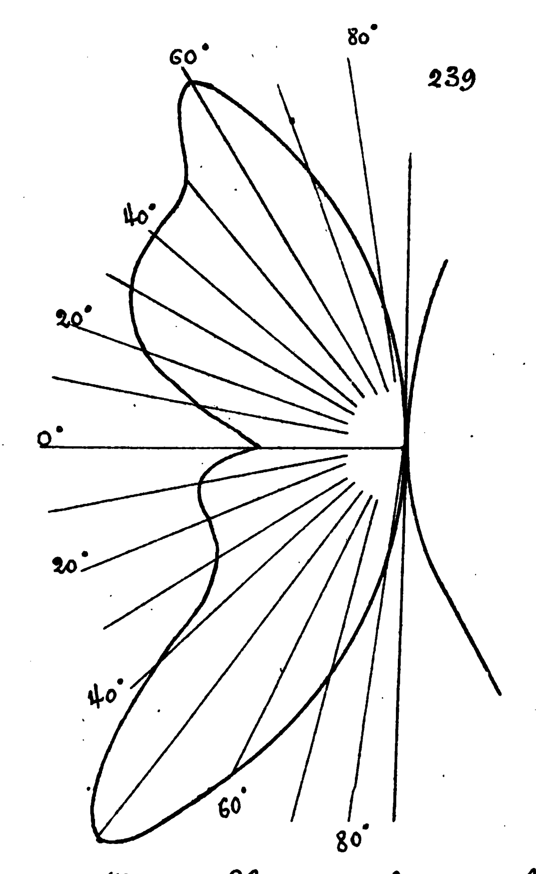
Le 1er terme du second membre peut-être considéré comme représentant l'intensité moyenne dans l'hémisphère supérieur et le second terme $\frac{H + M}{4}$, l'intensité moyenne dans l'hémisphère inférieur.

Si on remarque (Rousseau) que l'intensité horizontale est sensiblement égale aux $\frac{2}{10}$ de l'intensité maxima, on a :

$$I_{sm} = 0.35\ M$$

Mais cette dernière formule n'est qu'assez grossièrement approchée.

La courbe qui représente la distribution de lumière résultant d'un arc alimenté par courants alternatifs sera toute différente car les charbons sont dans ce cas à peu près semblables



L'intensité horizontale sera minimum car elle provient de l'arc et non des cratères.

Ainsi que cela a été prouvé par des expériences récentes de M. Uppenborn.

Il semble que les courbes supérieure et inférieure devraient être identiques ; mais pratiquement il existe une petite différence, en faveur du charbon supérieur, qui provient du courant d'air chaud ascensionnel qui élève la température du charbon supérieur et amène une dissymétrie vers le bas.

Il est rare qu'on emploie les arcs à feu nu ; on les entoure généralement d'un globe opalin qui diminue l'intensité maxima et donne une répartition plus uniforme à la lumière. Il convient alors de construire une courbe, analogue aux précédentes, lorsque la lampe est munie

de son globe

Éclat — L'intensité lumineuse d'une source n'est pas le seul élément qui la caractérise.

Deux sources peuvent en effet émettre la même quantité de lumière et n'avoir pas le même *éclat*.

La quantité de lumière émise par unité de surface constitue *l'éclat*.

Ainsi une source d'éclat e et de surface S peut émettre la même quantité de lumière qu'une source d'éclat e' et de surface S' il suffit pour cela qu'on ait la relation :

$$eS = e'S'$$

Le Tableau ci-dessous indique l'éclat de diverses sources lumineuses.

Sources Lumineuses	Éclat en bougies par centimètres carrés
Bec bougie Girond	0.06
Bec Argand	0.30
Petit brûleur intensif Siemens à régénérateur	0.38
Grand - id - . . - d° -	0.60
Lampe à incandescence	40.00
Lampe à arc	484.00

L'éclat de la surface du soleil serait incomparablement plus grand.

L'éclat du cratère positif d'une lampe à arc est indépendant de l'intensité du courant qui la traverse ; cet éclat est en effet celui qui correspond à une température fixe invariable dans toutes les lampes, la température de volatilisation du carbone.

Pour une lampe à incandescence il dépend de la température du filament qui dépend elle-même de l'intensité.

Il est facile de montrer, en partant de la formule de Voit-Wéber (p. 134) que l'éclat d'une lampe à incandescence varie en raison inverse de la puissance $\frac{3}{2}$ de la dépense spécifique.

$$e = \frac{K}{d^{\frac{3}{2}}}$$

d étant la dépense spécifique en watts par bougie.

Dans l'étude des sources lumineuses, il y a encore lieu de considérer la teinte ; deux foyers lumineux peuvent présenter une égalité ou une différence de teintes.

Des conventions ont été proposées à ce sujet en 1889 par M. Crova.

Soit I l'intensité totale de la source rapportée à la lampe Carcel (cette mesure peut se faire au photo-mètre par l'emploi de la solution verte de chlorure de nickel (voir p. 201), soit I' l'intensité de rouge de la source rapportée au rouge de la lampe Carcel le rapport $\frac{I}{I'}$ indiquera conventionnellement la teinte de la source rapportée à la teinte de la lampe Carcel.

Voici quelques nombres à ce sujet :

Soleil	0.50
Arc	0.59
Lampe Drummond . .	0.94 à 0.69
Carcel	1. ..

ce qui signifie que pour une même quantité totale de lumière, le soleil renferme la moitié moins de rayons rouges que la lampe Carcel, l'arc, les $\frac{59}{100}$ etc...,

On peut encore appeler le rapport inverse $\frac{I'}{I}$ <u>degré d'incandescence</u>, la valeur de ce rapport croit en effet à mesure qu'on pousse la lampe.

Le Congrès des Electriciens a émis le vœu que les constructeurs de lampes indiquent, outre le voltage et le nombre de bougies d'un type donné

son degré d'incandescence normal.

Problème de l'éclairement. — Pour terminer ces notions de photométrie, voyons comment on peut appliquer ces résultats à l'éclairement des surfaces.

La question est très complexe et comporte une large part de pratique et d'habitude.

Il convient tout d'abord de faire une distinction entre les espaces fermés et les espaces découverts.

Pour ces derniers l'étude est plus simple; la question revient en effet à celle-ci : produire, en chaque point d'un plan horizontal un éclairement minimum déterminé.

Voici, à ce sujet, quelques données concernant l'éclairement de Paris.

Prenons comme unité la bougie décimale de $\frac{1}{20}$ de Violle, soit $\frac{1}{10}$ de Carcel (environ).

L'unité d'éclairement est produite par 1 bougie décimale à 1 mètre; elle a reçu le nom de <u>lux</u>.

Voici quelques renseignements pratiques se rapportant à l'éclairement des espaces découverts :

A Paris	(Rue Royale)	1,6 lux
"	(Rue de la Paix)	1,5 -
"	(Place de l'Opéra)	0.7 -

A Paris (Avenue de l'Opéra) .... 0.43 lux

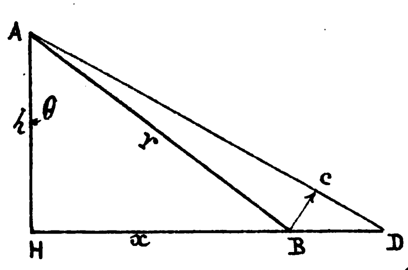
» (Rue du 4 Septembre) .... 0.43 -

(Moyenne pour tout Paris .. 0.05 lux)

Pour l'éclairement des locaux fermés, des spécialistes ont reconnu qu'il fallait 10 lux au moins pour lire et écrire sans fatigue ; 20 ou 30 pour un local bien éclairé. Enfin on constate 50 lux dans une salle éclairée à la lumière diffuse du jour.

Ces renseignements étant donnés nous allons aborder la question d'éclairement des locaux découverts.

1ère Question. — Etant donnée une place qu'il s'agit d'éclairer, trouver la répartition qu'il convient de faire des foyers lumineux ?



Nous supposerons d'abord qu'on emploie des foyers uniformes.

Cherchons l'éclairement produit par un foyer uniforme de I bougies à une distance $\underline{x}$ de son pied. Soit $\underline{h}$ la hauteur du foyer. L'éclairement de la surface BC est (voy. p. 204)

$\frac{I}{r^2}$. Les surfaces BC et BD recevant évidemment la même quantité de lumière, leurs éclairements seront en raison inverse de leurs surfaces, on aura donc :

$$\text{éclairement BD} = e = \text{éclairement BC} \times \frac{\text{surf. BC}}{\text{surf. BD}}$$

ou

$$e = \frac{I}{r^2} \times \frac{\text{surf. BC}}{\text{surf. BD}} = \frac{I}{r^2} \times \frac{h}{r}$$

$$e = \frac{Ih}{r^3}$$

or $r^2 = h^2 + x^2$

d'où

$$r^3 = (h^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}$$

donc l'éclairement est :

$$e = \frac{I \times h}{r^3} = \frac{I \times h}{(h^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Tout est connu dans cette formule on pourra donc en déduire l'intensité à donner aux foyers lumineux si l'on connait la hauteur ou cette dernière si l'on connait l'intensité, de manière à avoir un éclairement donné $\underline{e}$ à une distance $\underline{x}$. Si $\underline{e}$ est exprimé en bougie-mètres, $\underline{h}$ et $\underline{x}$ en mètres, I sera exprimé en bougies.

Nous pouvons appliquer ces notions à résoudre les deux questions suivantes :

1° — Éclairement d'une rue au moyen de foyers placés en ligne droite :

A M P B

Soit a la distance de deux candélabres : $AB = a$. L'éclairement en M sera, en désignant AM par x,

$$\frac{Ih}{(h^2+x^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{Ih}{[h^2+(a-x)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Toutes les conditions usuelles, cet éclairement sera minimum au milieu P de AB : en ce point il est égal à :

$$e_P = \frac{2\,Ih}{\left[h^2+\left(\frac{a}{2}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

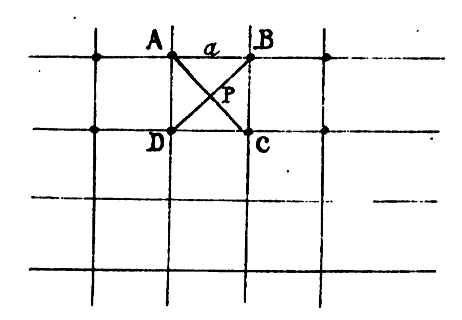
Si nous nous imposons un éclairement minimum donné (l'éclairement de Paris pourra nous donner d'utiles renseignements), une hauteur de candélabre donnée, et une intensité lumineuse donnée pour chaque foyer, la formule précédente permet de calculer a, distance à donner aux candélabres. C'est ainsi qu'a été calculé le tableau suivant :

Distances de 2 candélabres en mètres

Minimum de l'intensité hor.le en lux	I = 500 bougies décim. h			I = 600 b.d. h			I = 700 b.d. h			I = 800 b.d. h			I = 900 b.d. h			I = 1000 h		
	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14	6	10	14
0.5	44	50	54	47	54	58	50	57	62	52	60	67	54	64	68	56	65	71
1	34	38	39	37	41	43	39	44	46	41	46	49	43	48	52	44	50	54
2	26	28	28	28	30	30	30	33	32	32	35	35	31	36	37	34	38	39

L'éclairement d'une rue au moyen de foyers placés en quinconce des deux côtés de la rue se traiterait de même.

2° — Eclairement d'une place au moyen de foyers disposés aux sommets de carrés.



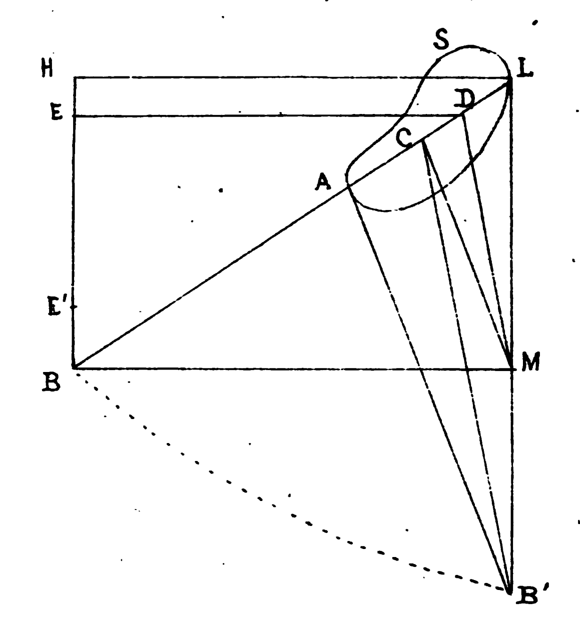
Soit a le coté du carré : l'éclairement minimum a lieu ici au centre P de chaque carré

Il est égal à

$$e_P = \frac{4Ih}{\left[h^2 + \frac{a^2}{\alpha}\right]^{\frac{3}{2}}}$$

Cette formule permet encore de calculer $\underline{a}$ si on se donne I, h, e_P, c'est-à-dire le côté d'un carré dont l'éclairement minimum e_P serait obtenu au moyen d'une source de 1 bougie placée à une hauteur $\underline{h}$.

En réalité, les choses sont plus compliquées: les sources employées en général n'étant pas uniformes, on ne peut plus admettre, pour la répartition de l'éclairement dans le plan horizontal, la formule simple que nous avons donnée plus haut; il faut la trouver empiriquement:



on y arrive de la manière suivante: Supposons connue la forme de la courbe $\underline{S}$ qui donne la valeur de l'intensité

lumineuse de la source suivant les différentes directions dans un plan vertical (1).

Soit L le foyer lumineux situé à une hauteur LM au dessus du plan horizontal. Cherchons l'éclairement produit par ce foyer non uniforme en un point B situé à une distance BM du pied du candélabre : pour ce point, la source se comporte comme une source uniforme d'intensité LA. Faisons la construction suivante : Prenons sur LM, LB' = LB, joignons AB' et menons MC parallèle à AB'. Joignons CB' et menons MD parallèle à B'C, enfin menons l'horizontale DE. On a

$$LC = I\frac{h}{r}$$

$$LD = I\frac{h^2}{r^2}$$

$$EH = \frac{I h^3}{r^3}$$

$$EH = h^2 \times \frac{Ih}{(h^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Ainsi EH est proportionnel à l'éclairement cherché au point B. On prendra BE' = EH, on joindra par un trait continu tous les points tels que E' et cette courbe représentera la réparti-

(1) Si la lampe est munie d'un globe, la courbe S doit se rapporter à ce cas (Voir plus haut).

-tion réelle de l'éclairement dans le plan hori-
-zontal.

La fig. ci-dessous donne le résultat de cette construction (courbe B) sur la même fig. on a tracé deux autres courbes A et C.

E
1000
A
500
B
480
200
100
185
C
57
3ᵐ
2ᵐ
1ᵐ
0

La première re-
-présenterait l'éclairement du plan horizontal par une source uniforme qui aurait une in-
-tensité constante et égale à l'intensité maxima de la lampe à arc employée. La courbe C re-
-présenterait l'éclairement du plan horizontal par une source uniforme qui aurait une in-
-tensité constante et égale à l'intensité moyenne sphérique de la lampe à arc employée. Enfin la courbe B représente l'éclairement réel. On voit combien on se tromperait si on substituait un calcul trop simple fondé sur l'hypothèse d'une source uniforme, à la construction empirique que nous avons indiquée.

Les questions que nous avons traitées plus

haut (éclairage d'une rue, d'une place) se traitent d'ailleurs aussi simplement lorsqu'on tient compte de l'éclairement réel ; seulement le calcul sera remplacé par une construction graphique : si par exemple les foyers sont en ligne droite, on construira les courbes d'éclairement des deux foyers consécutifs ; l'éclairement total sera la somme des ordonnées de ces courbes, et on déterminera l'inconnue du problème (qui pourra être soit l'intensité, soit la hauteur, soit la distance des foyers) de telle sorte que l'éclairement minimum ait une valeur donnée.

Voici quelques renseignements sur les données pratiques adoptées.

Hauteur des Candélabres (arc)

Intensité du courant	Intensité maximum	Hauteur
10 amp.	240 carcels	10 mètres
13 "	328 "	15 "
15 "	390 "	18 "
18 "	490 "	20 "

La question de l'éclairage des locaux fermés

tels que halles, usines, ateliers, etc.., peut se traiter en s'imposant un éclairage déterminé par m. carré. Le tableau suivant donne des indications à cet égard..

Nature de l'espace à éclairer	Nombre de mètres carrés par Lampe de 10 ampères. 240 carcels au maximum.
Espaces découverts	2000
Halles de Gares	1400
Fonderies (Eclair.t général)	500 - 600
-d°- (- spécial)	200 - 250
Fabrique de machines	200
Filatures, tissages	200

Pour des locaux tels que appartements, salles de spectacle, la question se complique encore d'une multitude de conditions : tentures, couleurs etc..., Ce n'est plus tant une surface qu'il s'agit d'éclairer qu'un volume déterminé.

On peut, dans le cas d'éclairage de salons, par exemple, admettre comme valeur moyenne de l'éclairement une demi-bougie par mètre cube. Mais ce nombre doit varier avec la hauteur de la pièce à éclairer.

9e Leçon

Distributions électriques

Le plus souvent l'énergie électrique n'est pas utilisée au lieu même de production. Elle doit être transportée et distribuée. C'est le cas, par exemple, des stations centrales d'éclairage et de transmission de puissance mécanique.

Nous nous occuperons plus spécialement, dans cette leçon et celles qui vont suivre, des systèmes de distribution appliqués à l'éclairage; toutefois les règles que nous établirons pourront s'appliquer, le plus généralement, au problème de la transmission de la force. Pour ce cas particulier nous renvoyons le lecteur au cours de l'année dernière où cette question a été traitée avec quelques développements

En premier lieu nous mentionnerons un caractère général de toute transmission électrique qu'on doit toujours avoir présent à l'esprit :

Tout conducteur parcouru par un courant, subit une élévation de température.

Cet échauffement, inévitable en pratique, entraîne deux inconvénients que l'on devra étudier séparément dans chaque cas.

1° — Cet échauffement occasionne une perte de puissance égale à RI^2

R étant la résistance d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité I.

2° — Il peut être une cause de danger permanent et amener des incendies si la température s'élève au delà d'une certaine limite.

Si l'on se fixe la quantité d'énergie que l'on consent à perdre par le fait du passage du courant dans le conducteur, on obtiendra tout d'abord par cette condition, une limite inférieure de la section.

Soit un conducteur l devant transmettre une puissance W. On se donne comme condition de perdre dans le conducteur tant pour cent de cette énergie soit $\frac{m}{100}$ W.

La résistance du conducteur étant $R = \frac{a l}{s}$ on aura l'équation :

$$I^2 \frac{a l}{s} = \frac{m}{100} W$$

qui, résolue par rapport à S, nous donne-ra :

$$S = \frac{a l I^2}{\frac{m}{100} W}$$

Il n'est pas aussi facile d'envisager la question d'élévation de température. Remar-quons qu'il y a, en même temps production de chaleur par le courant, et refroidissement. Donc, quand l'équilibre est atteint ou quand la température reste stationnaire la chaleur dissipée ou perdue est égale à la chaleur engendrée.

On distingue trois causes de refroidisse-ments d'un conducteur :

1° — par conductibilité thermique ;

2° — par rayonnement ;

3° — par convection ;

La première de ces causes est la moins importante car l'étendue des points d'attache est insignifiante par rapport à l'étendue totale du conducteur.

Le refroidissement par rayonnement a été étudié dans la première leçon à propos de l'énergie rayonnante.

Quant au refroidissement par convection, il doit s'entendre des courants d'air froid qui s'établissent autour d'un conducteur par suite du déplacement de l'air échauffé à son contact, il se produit de ce fait de véritables tourbillons favorables au refroidissement.

Le refroidissement par rayonnement est assez facile à étudier.

Soit un conducteur de résistance R parcouru par un courant d'intensité I, nous savons que la puissance qui apparaît sous forme de chaleur est

$$RI^2$$

Si nous appelons S la surface latérale du conducteur A la quantité de puissance perdue pour chaque degré d'élévation de température t le nombre de degrés dont s'élève la température

du conducteur, on aura

$$RI^2 = ASt$$

Remplaçant R et S par leurs valeurs, il vient

$$\frac{al}{\pi r^2} I^2 = A 2 \pi r l t$$

d'où nous tirons

$$t = \frac{a I^2}{A 2 \pi r \times \pi r^2} = \frac{a}{2\pi^2 A} \frac{I^2}{r^3}$$

Pour l'instant nous retiendrons donc ceci : c'est que l'élévation de température d'un conducteur est sensiblement proportionnelle au rapport $\frac{I^2}{r^3}$ ou $\frac{I^2}{d^3}$

d étant le diamètre du conducteur.

de sorte que si l'on se propose de déterminer le diamètre d'un conducteur parcouru par un courant I de façon à produire une élévation de température de t° au maximum, on aura

$$d^3 = K \frac{I^2}{t}$$

Le calcul précédent suppose que la perte de chaleur est proportionnelle à l'excès de la température

fil sur la température ambiante ; en réalité
n'est pas exact ; il vaut mieux mesurer
érimentalement la perte de puissance par
timètre carré, pour chaque valeur de E. Le
eau suivant a été obtenu par M. Kennely
laboratoire Edison : il se rapporte à un
nu et poli suspendu à l'air libre.

ès de pérature	Perte de puissance par centimètre carré	Excès de température	Perte de puissance par centimètre carré
10	0,005473	80	0,05817
20	0,01138	90	0,06827
30	0,01776	100	0,07919
40	0,02466	200	0,24973
50	0,03210	300	0,61698
60	0,04013	400	0,86449
70 ...	0.04881	500	0,93886

A cette perte par rayonnement vient s'ajouter
erte par convection. On a trouvé que cette
nière est sensiblement indépendante du dia-
tre du fil et égale à 0,00175 t watt, par cha-
centimètre de longueur de fil

Nous sommes en mesure maintenant de

déterminer la quantité totale de chaleur perdue par un fil de 1 cm. de long.

La surface latérale (d étant le diamètre) a pour expression πd.

Assignons une élévation de température maximum de 20° par exemple ; la puissance perdue par rayonnement est, d'après le tableau précédent

$$\pi d \times 0.01138 \text{ watts}$$

La perte par convection est : $0.00175 \times 20° = 0{,}035$ w.

Par suite la perte totale de puissance est :

$$\pi d \times 0{,}01138 + 0.035$$

Pour que l'équilibre existe, on devra avoir l'égalité :

$$\frac{4\alpha}{\pi d^2} I^2 = \pi d \times 0{,}01138 + 0.035$$

qui permet de résoudre la question suivante :

Quel diamètre doit-on donner à un fil de cuivre devant transmettre un courant de I ampères, en ne tolérant qu'une certaine élévation de température fixée d'avance ?

Il existe des règlements spéciaux fixant le

nombre de degrés d'élévation de température qui peut être toléré.(1)

Les considérations qui précèdent ne s'appliquent qu'à des conducteurs nus fixés en plein air. Des ouvrages spéciaux donnent des tables permettant de déterminer rapidement les diamètres des conducteurs dans le cas qui nous occupe.

La question se présente différemment quand il s'agit de conducteurs recouverts d'un isolant placés à l'intérieur des habitations.

Il y a dans ce cas un grand intérêt pratique à étudier la question en raison des dangers d'incendie qu'on doit écarter avant toute autre considération.

A ce sujet, on a entrepris d'autres séries d'expériences qui ont abouti à des résultats assez simples.

Cette simplicité, paradoxale au premier abord, provient de ce que, dans le cas d'un fil placé sous moulure en bois, la perte par conduction est supprimée.

Bien plus l'isolement d'un fil n'intervient que pour empêcher son refroidissement et ce résultat

(1) 10° par ex. par les règlements anglais

ne nous étonnera pas si nous remarquons que l'enveloppe isolante augmente, dans une notable mesure, la surface de refroidissement.

Bref, les fils isolés placés sous moulures ne subissent pas d'élévation de température sensiblement plus grande que ceux non-isolés et placés à l'air libre.

Les expériences de M. Kenelly ont donné

$$I^2 = Kd^3$$

d'où la formule $I = Kd^{\frac{3}{2}}$ applicable aux fils placés sous moulures.

Si l'on ne tolère qu'une élévation de température de 10°, la constante K a pour valeur 4.375, d'où

$$I = 4.375\ d^{\frac{3}{2}}$$

de laquelle on peut tirer le diamètre par la formule :

$$d = 0.374\ I^{\frac{2}{3}}$$

Les résultats d'expériences sont consignés dans le tableau ci-après et correspondent à une élévation de température de 10°.

Dimensions

Dimensions des Conducteurs

Intensité maxima en Ampères	Diamètre minima en millimètres	Pertes de charges en volts par Kilomètre	Intensité maxima en Ampères	Diamètre minima en millimètres	Pertes de charge en volts par Kilomètre
1	0.38	165.0	85	7.24	38.6
5	1.09	100.0	90	7.52	37.9
10	1.75	77.7	95	7.80	37.2
15	2.29	68.1	100	8.08	36.5
20	2.77	62.1	110	8.61	35.3
25	3.20	58.1	120	9.09	34.6
30	3.61	54.8	130	9.58	33.7
35	4.01	51.8	140	10.01	33.7
40	4.37	49.9	150	10.5	32.0
45	4.72	48.1	175	11.7	30.5
50	5.08	46.1	200	12.8	29.1
55	5.41	44.7	225	13.8	28.0
60	5.72	43.7	250	14.9	26.8
65	6.05	42.3	275	15.8	26.2
70	6.35	41.3	300	16.8	25.3
75	6.55	40.3	350	18.6	24.2
80	6.90	39.3	400	20.3	23.1

L'expérience a montré qu'un courant double de celui correspondant à chaque diamètre élève la température du conducteur de 40° au-dessus de la température ambiante.

Il est à remarquer que l'emploi de cette formule ne conduit pas à une densité de courant constante pour le conducteur.

Si l'on fait le calcul pour le tableau précédent on obtiendra une densité variant de 8.8 pour le cas d'un conduct.r de 0m/m 38 parcouru par 1 ampères, à 1.27 pour un conducteur de 20m/m 3 parcouru par 400 ampères. On voit donc que la densité du courant (nombre d'ampères par milli-mètre carré) doit être d'autant plus faible que le courant à transmettre est plus intense. C'est donc une erreur de croire qu'il suffit, pour écarter tout danger, d'avoir une densité constante en tous les points.

Telles sont les règles qui doivent présider à l'établissement des conducteurs et que l'on peut résumer de la façon suivante :

Employer une section convenable pour éviter :
1° — des échauffements nuisibles ou dangereux ;
2° — une perte de puissance trop grande dans la ligne.

Si ces deux conditions conduisent à des sections différentes, il est évident qu'on devra

choisir la plus grande section.

Coupe-circuits. — Un réseau général ayant été calculé suivant les considérations qui précèdent on est certain d'éviter des échauffements excessifs et de longue durée ; il faut maintenant se mettre à l'abri des échauffements anormaux ou accidentels qui peuvent résulter de diverses causes.

La plus générale de ces causes consiste dans la mise en contact de deux conducteurs d'un même circuit ou de deux points d'un même conducteur autrement que par les appareils récepteurs. Cet accident porte le nom de court-circuit ; il supprime évidemment une partie des résistances du circuit et amène une augmentation de l'intensité et par suite un échauffement qui peut être dangereux.

Pour se prémunir contre ces accidents il est d'usage d'intercaler sur les circuits des conducteurs fusibles, dont la section est telle qu'une élévation de température déterminée puisse amener la fusion de ces conducteurs. On les nomme des coupe-circuits.

En général on emploie selon l'intensité

du courant qui doit la traverser, des fils ou des bandes de plomb ou de tout autre alliage fusible à une basse température.

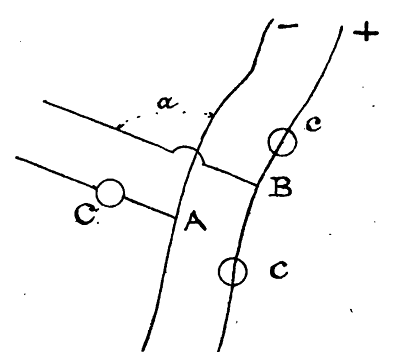
Comment, à l'aide de coupes-circuits, doit on protéger un réseau pour que la protection soit efficace ?

Tout réseau peut être considéré comme formé de conducteurs principaux et de conducteurs secondaires dans lesquels on pourra toujours distinguer une ligne + et une ligne −

Théoriquement il suffirait de placer un coupe-circuit sur les diverses parties d'un même conducteur. Cette protection suffirait si l'on avait soin de placer le coupe-circuit sur les divers tronçons de la canalisation ayant toujours même polarité. Mais, dans un réseau de quelque étendue, on n'est jamais sûr que cette condition soit remplie. Dès lors la protection n'est pas efficace.

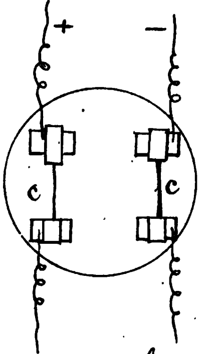
Si par exemple, il se produit un contact

tel que a entre de conducteurs de polarité différente, les coupe-circuits c seraient sans action préservatrice.



Donc, en règle générale, on doit protéger tous les conducteurs sans distinction et cela chaque fois qu'un conducteur change de direction.

Les coupe-circuits se construisent de bien des façons différentes. La fig. ci-contre représente un coupe-circuit double.



Il existe certains coupe-circuits fondés sur des actions électro-magnétiques dans lesquels on n'a pas à remplacer les plombs fondus mais leur complication est plus grande et leur fonctionnement moins sûr que pour les précédents : On doit en général se garantir contre les projections de plomb

fondu qui pourraient être une cause de dangers. La section des plombs fusibles est très facile à déterminer ; on emploiera la formule générale :

$$d = k I^{\frac{2}{3}}$$

d - diamètre du fil fusible

I - intensité du courant qu'on ne veut pas dépasser

Pour le plomb : k = 0,093

Pour l'étain : k = 0.078

Voici d'ailleurs un tableau donnant les relations entre les diamètres de fils de plomb et ceux des conducteurs qu'il s'agit de protéger.

Dimensions des conducteurs

Diam. du fil de cuivre	Diam. du fil de plomb
1 millim.	0.8 millim.
2 -	1.5 -
3 -	2. -
4 -	3. -
5 -	2 fils de 3 -

En dehors du plomb, on peut employer d'autres métaux : le platine semble le plus convenable pour les fils fin, et l'étain pour les gros. Ces

métaux ne donnent en effet pas lieu aux projections de globules incandescents lors de leur fusion ainsi que cela se produit avec le cuivre, l'aluminium, le fer.

Conditions générales d'installation des réseaux.

Les distributions électriques sont en général formées de deux fils isolés en relation l'un avec le pôle + l'autre avec le pôle − du générateur.

On pourrait à la rigueur supprimer un des fils en mettant le pôle correspondant de la source et de l'appareil récepteur en communication avec la terre. Dans le cas de f. e. m. relativement élevées ce système présente de graves inconvénients au point de vue des pertes par dérivation.

En télégraphie, et téléphonie, pour l'installation des sonneries, des appareils enregistreurs, on se sert habituellement de la terre comme retour.

Considérons un système de distribution à un potentiel constant de 100 volts, avec retour par la terre. On conçoit qu'une personne touchant

A
B
c
d.

la borne d'un des appareils récepteur se mettra dans le circuit de l'appareil et sera soumise en réalité à une différence de potentiel de 100 volts et recevra un choc aussi intense que si elle touchait au même instant les deux bornes de la machine.

De plus ce système constitue une des causes les plus actives de destruction des enveloppes isolantes.

Il est facile de se rendre compte de cette action destructive. Un conducteur est en effet formé d'une âme métallique et d'une enveloppe isolante. Or, il n'est pas d'isolant parfait, les isolants ne sont en réalité que des corps plus ou moins mauvais conducteurs. Il existe donc des courants dérivés du conducteur à la terre et il se produira des actions chimiques ou électrolytiques qui amèneront une destruction d'autant plus rapide de l'isolant que la différence de potentiel sera plus grande.

Enfin, un autre inconvénient consiste dans la formation d'un court-circuit lorsque un point du conducteur vient à être mis accidentellement en communication avec la terre.

On trouvera donc, en général très peu d'ins-

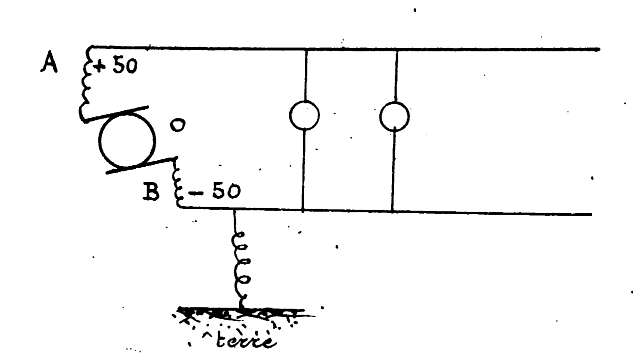
-tallations

industrielles où l'on profitera du retour par la terre pour supprimer un conducteur.

Cependant, on rencontre en Amérique de nombreuses installations de tramways électriques où le retour s'effectue par la terre ou plus exactement par les rails de la ligne (1)

On emploie donc habituellement deux conducteurs ; voyons quels avantages on retirera de cette manière de faire?

Prenons une distribution à 100 volts par exemple ; à l'état normal et pour un isolement parfait, le milieu de la machine sera au potentiel zéro, la borne A étant à un potentiel de +50 et la borne B à un potentiel de −50. Dans ce cas, la différence de potentiel entre un conducteur quelconque et la terre n'est donc plus que de 50 volts d'où il résulte :



(1) Nous ajouterons que, en France, une loi récente (7bre 1893) prohibe d'une façon absolue ce genre de distribution, d'ailleurs peu répandu.

1° - un danger moindre.

2° - une destruction moins rapide des isolants.

Si l'on considère, sur l'un quelconque des conducteurs, un point mis à la terre, il en résultera que ce point sera au potentiel zéro et que le milieu de la machine n'y sera plus. Cependant un pareil circuit pourra continuer à fonctionner et les coupe-circuits ne sauteront pas ; néanmoins on devra corriger immédiatement ce défaut car, si un point de l'autre conducteur vient à être mis en communication avec la terre il se produira immédiatement un court-circuit.

L'isolement d'une ligne doit donc avoir une valeur déterminée qu'il est bon de vérifier de temps à autre. Des règlements particuliers fixent dans divers cas, la résistance d'isolement que doit présenter une ligne ; cette résistance est fixée en milliers d'Ohms en mégohms, etc..., par kilomètre d'installation.

Les chiffres indiquant un isolement kilométrique n'ont rien d'absolu ; ils dépendent évidemment de la tension plus ou moins élevée et du développement de la ligne.

Les essais d'isolement se font à l'aide de mesures particulières relevant de l'électrométrie.

Indépendamment de ces mesures qui peuvent s'effectuer périodiquement il est d'usage d'employer d'une façon permanente un indicateur de terre (1)

Un indicateur est donc un appareil qui entre en fonction dès qu'un point de la canalisation est mis accidentellement en communication avec le sol.

Un modèle très simple à établir dans toute distribution électrique est réalisé de la façon suivante

Entre les deux conducteurs, on place deux lampes en tension d'un voltage tel que chacune d'elles puisse être allumée normalement si on la place directement en dérivation sur le circuit. Le milieu du fil de jonction des

(1) On désigne sous le nom de terre un point d'un conducteur présentant un défaut d'isolement par rapport à la terre. Le potentiel de ce point est évidemment d'autant plus voisin de celui de la terre que le défaut est plus grand.

des deux lampes est en communication avec la terre. Quand le circuit ne présente aucun défaut d'isolement, les deux lampes s'allument au rouge seulement; il est facile de voir ce qui se produira si l'une des deux lignes vient à être mise en communication avec la terre. Supposons que la ligne — soit en communication avec la terre par m n : cette dérivation présentant une résistance plus faible que la lampe l', cette dernière va s'éteindre pendant que la lampe l va briller d'un éclat d'autant plus vif que la terre sera plus parfaite.

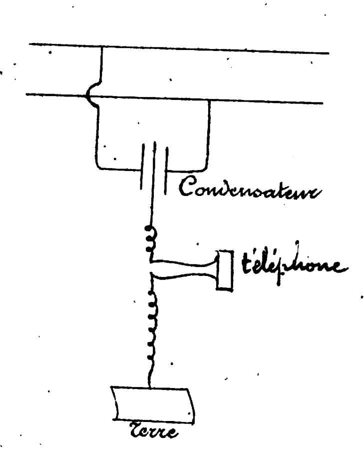
Un tel défaut se traduira donc par l'extinction de la lampe placé du côté du conducteur présentant le défaut et par l'allumage de l'autre.

L'appareil peut être complété par une sonnerie S placée sur le fil de dérivation à la terre. Cette sonnerie qui, lorsque la ligne est bien isolée n'est traversée par aucun courant, entre en fonctionnement dès qu'un défaut se produit et avertit ainsi du danger que l'on doit rechercher aussitôt.

Cet appareil peut s'appliquer aux courants alternatifs mais alors il est prudent d'interposer sur le fil de terre un interrupteur permettant de

n'établir la communication qu'au moment où l'on consulte l'appareil. Ce dernier ne donne donc plus, comme précédemment, des indications permanentes.

M. Picou a imaginé d'intercaler sur le fil de terre un téléphone sonore qui entre en action dès qu'une terre se déclare. Le fil de dérivation à la terre est, dans ce cas, relié à une feuille d'un condensateur au lieu de l'être directement à la canalisation.



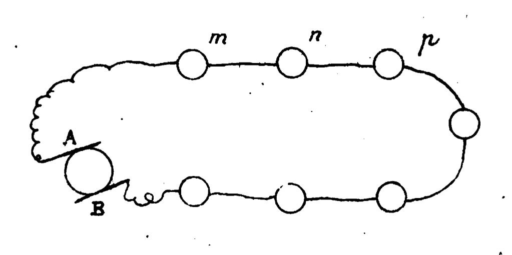
Calcul des Conducteurs
destinés à l'alimentation d'un réseau.

La distribution de l'énergie électrique se fait de deux façons différentes selon la manière dont on dispose les appareils récepteurs. On distingue:

1° la distribution en série,

2° la " en dérivation.

1° — Distribution en série. — Dans ce système tous les organes récepteurs m, n, p ... sont placés sur un conducteur unique reliant les 2 bornes A et B de la source.



L'intensité du courant qui traverse chacun de ces appareils est donc la même pour tous les points du circuit ; en raison de ce fait, ce système est encore appelé distribution à intensité constante.

Il exige que les appareils soient munis d'un dispositif les mettant automatiquement en court-circuit dès qu'ils deviennent inactifs.

Si E est la f.e.m nécessaire au fonctionnement d'un appareil

e' la f.e.m inverse d'un récepteur

n le nombre de ces récepteurs

R la résistance du circuit.

On aura :

$$I = \frac{E - ne'}{R}$$

Dans un circuit ainsi constitué, si l'on vient

à faire varier le nombre d'appareils récepteurs, on doit chercher à maintenir I constant. On y arrive en faisant varier E ; il faut donc installer une machine à f. e. m. variable. (C'est le cas du transport de force de Gênes que nous avons étudié dans le cours de l'année dernière).

Ce système de distribution se prête bien à l'éclairage par lampes à arc (régulateurs différentiels)

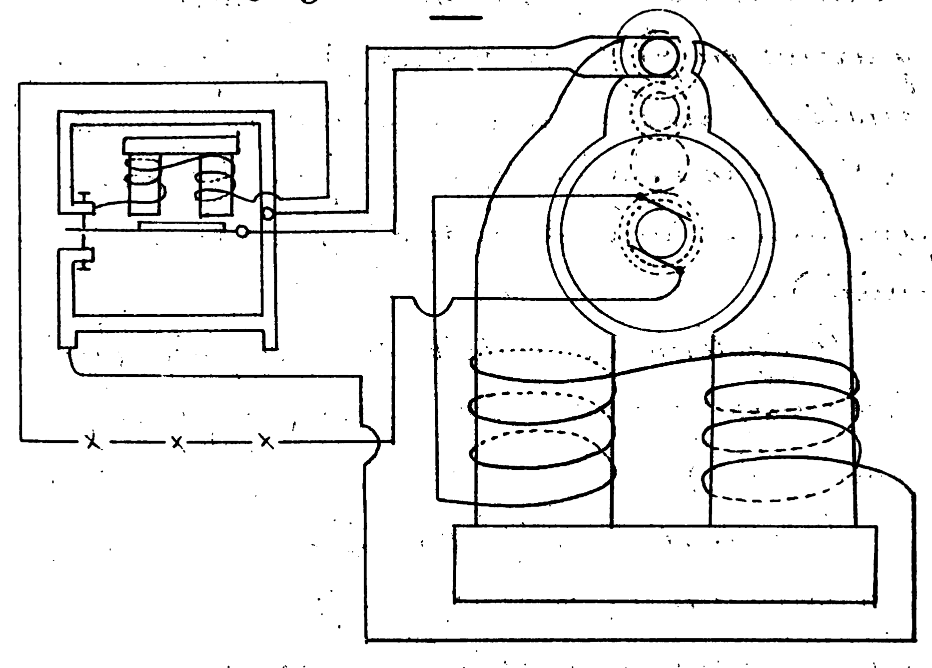
La variation de la force électro motrice peut s'obtenir par la variation du calage des balais; mais comme il en résulte de nombreuses étincelles on doit employer des machines avec dispositif spécial permettant d'atténuer cette production d'étincelles.

Telles sont les machines Thomson-Houston et de Leeds.

Dans les premières on emploie un système de ventilation ou de soufflage des étincelles.

Dans les secondes on emploie une petite dynamo supplémentaire tournant dans un sens ou dans l'autre et communiquant son mouvement au porte-balais

Réglage de dynamo Leeds.



Ce mode d'éclairage est fort employé en Amérique pour des grands boulevards.

La distribution en série est même appliquée à l'éclairage par incandescence. Dans ce cas, on emploie des lampes à filaments gros et courts pouvant supporter un courant intense, 10 ampères par exemple. De plus ces lampes doivent être munies d'un commutateur spécial fermant automatiquement le circuit dès qu'un filament vient à se rompre.

La lampe Bernstein qui appartient à ce système est aussi très employée en Amérique.

Il existe encore un modèle spécial de douilles pour lampes Edison. Quand on visse une lampe dans cette douille, la lampe se trouve placée dans le circuit général ; quand on la dévisse un contact à ressort rétablit le circuit.

En outre, un dispositif spécial ferme encore le circuit lors de la rupture du filament de la lampe.

A

feuille de papier

B

Ce support se compose essentiellement de deux douilles en cuivre A et B isolées et placées en dérivation par rapport aux conducteurs. Ces deux pièces sont séparées par une mince feuille de papier qui, en raison de la grande différence de potentiel qui existe entre les pièces A et B, brûle et établit le contact entre les pièces mettant ainsi la lampe en court-circuit dès que le filament est rompu.

Le calcul d'une telle distribution ne présente aucune difficulté.

En premier lieu, l'intensité est déterminée par le type de lampe que l'on veut employer.

On applique ensuite la règle de M. W. Thomson (1) à la détermination de la densité la plus économique du courant. Le rapport $\frac{1}{S}$ étant connu on en déduit la valeur de la section et par suite celle de la résistance par la connaissance de la longueur de la ligne.

Quant à la f.e.m. elle sera évidemment déterminée par le nombre d'appareils récepteurs à placer dans le circuit.

La règle de Thomson s'applique spécialement aux installations ayant un caractère définitif où l'on peut avoir intérêt à augmenter les frais de premier établissement et diminuer ceux résultant de l'exploitation.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque l'installation a un caractère provisoire (chantiers, salle de fêtes, etc...,) on peut avoir intérêt à rechercher l'économie des frais de premier établissement au détriment des frais d'exploitation.

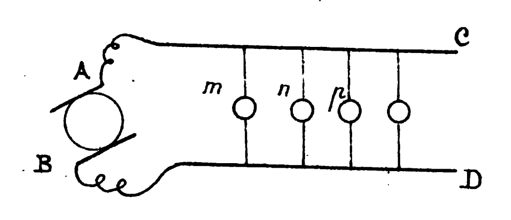
En tout cas, la section étant déterminée, il y a lieu de remarquer qu'elle n'a rien d'absolu. On devra tout d'abord s'assurer qu'elle conduit à une densité acceptable c'est-à-dire qu'elle ne

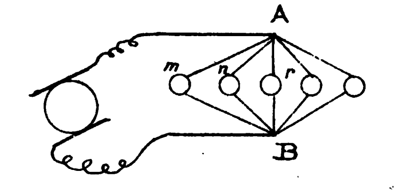
(1) Voir le cours de l'année 1892-93 page 281.

donnerait pas lieu à un échauffement dange-reux.

2° = Distribution en dérivation. – Ce mode de distribution est le plus répandu car il s'applique au cas où le régime est variable et où l'on doit assurer l'indépendance des appareils récepteurs.

Dans ce système tous les appareils récepteurs sont placés en dérivation soit entre deux conducteurs AC, BD soit entre 2 points A et B.





Les appareils ne nécessiteront plus alors, comme dans la distribution en série, un dispositif le mettant en court circuit lorsqu'on ne veut pas les utiliser.

La différence de potentiel entre les deux conducteurs ou entre les deux points doit être maintenue constante, d'où le nom de distribution à potentiel constant que l'on a donné à ce mode de distribu-

On tolère au plus des écarts de 1 à 2 % de part et d'autre du voltage normal.

Nous nous occuperons dans la prochaine leçon des principaux calculs que peut amener (à faire une distribution en dérivation.

10e Leçon

Distributions électriques (Suite)

Nous aborderons le problème de la distribution électrique par le cas suivant qui est le plus simple :

Etant donnés 2 points A et B entre lesquels on maintient par un procédé, que nous n'avons pas à considérer quant à présent, une différence de potentiel constante, on veut distribuer le courant à partir de ces points pour alimenter n lampes à incandescence par exemple.

Pour abréger, nous appellerons centre de distribution l'ensemble de deux points A et B entre lesquels on maintient constante, par un procédé quelconque, la différence de potentiel.

Le procédé le plus simple consistera à placer toutes ces lampes en dérivation sur deux conducteurs

partant des points A et B.

Pour qu'une lampe à incandescence[(1)] fonctionne dans de bonnes conditions, il faut que la différence de potentiel soit maintenue constante à ses bornes et de plus qu'elle diffère très peu du voltage normal V_n indiqué par le constructeur.

Nous admettrons, par exemple, que la tension aux bornes de la lampe ne devra pas différer de plus d'une certaine fraction $\frac{x}{100}$ du voltage nominal; cette tolérance ne doit pas dépasser habituellement plus de 2%.

Supposons que V soit la différence de potentiel entre les points A et B. Cette tension va en diminuant à partir de ces points. Si I est l'intensité du courant fourni par la machine et i l'intensité nécessaire au fonctionnement de chaque lampe, le courant sera approximativement :

$I - i$, à partir du point a

$I - 2i$ " " b

$I - 3i$ " " c

et ainsi de suite.

Il y aura perte de volts de A en a, de

a en b, de b en c, etc... et cette perte sera maximum pour la dernière lampe (1)

Si l'on veut calculer une canalisation, de telle sorte que la perte en volts, ne varie pas de plus de $\frac{aV}{100}$, on se heurtera à des calculs longs et pénibles. On pourra éviter tous calculs en employant des câbles à forte section et par suite d'une résistance très faible.

Mais on n'aura alors aucune certitude d'avoir établi la ligne d'une façon économique c'est-à-dire d'avoir employé le minimum du poids de cuivre.

Il faut donc se placer dans un juste milieu entre l'absence de calculs qui conduirait à employer des câbles de sections trop fortes qui, il est vrai, réussiraient à coup sûr, mais coûteraient trop cher, et des calculs longs et méticuleux qui amèneraient des variations de section d'une lampe à l'autre.

---

(1) - Cette perte de volts a été rendue très sensible par une expérience faite au cours. Entre les points A, a, b, c on a intercalé 3 résistances de maillechort, la 1ère lampe était très brillante, la 3e était à peine rouge.

Donc, dans ce cas,

Ni trop ni trop peu de calculs.

Etude de la distribution en dérivation simple.

Nous simplifierons encore le problème de la distribution en supposant que les lampes à alimenter forment un groupe unique situé à une distance déterminée du centre de distribution. C'est évidemment là un cas très simple qui aura son application en pratique dans le cas de l'éclairage d'une maison branchée sur une canalisation d'usine centrale.

Soit i l'intensité nécessaire à une lampe, pour n lampes le courant total fourni par la machine sera donc $I = ni$.

Soit r la résistance d'un kilomètre de fil, en appelant l la distance en kilomètres du centre de distribution AB au lieu d'utilisation CD, la résistance totale sera $R = 2lr$ et la perte en volts égalera:

A C V B D l

$2lrni$

Pour que les lampes fonctionnent bien, il faut que cette perte soit au plus égale à $\frac{aV}{100}$, d'où nous tirons l'égalité :

$$Rni = 2lrni = \frac{aV}{100}$$

Si, comme nous l'avons déjà dit nous admettons une perte maximum de 2% nous aurons :

$$r = \frac{aV}{200\,lni} = \frac{V}{100\,lni}$$

Application. — Soit à établir une canalisation devant alimenter 50 lampes de 16 bougies fonctionnant à 110 volts et 0,6 d'ampère, la distance du centre de distribution au lieu d'utilisation étant de 500 mètres.

On aura :

$$r = \frac{110}{100 \times 0.5 \times 50 \times 0.60}$$

$$r = \frac{110}{1500} = 0.0733$$

On consultera un catalogue ou un aide-mémoire qui nous donnera immédiatement le diamètre du fil répondant à une résistance kilométrique de 0.0733, on trouve ainsi qu'il faudra employer un câble de 250 millim. carrés de section environ.

Si nous nous plaçons maintenant au point de vue économique, nous diviserons la question en

deux parties selon qu'il s'agira :

1°. de conducteurs nus -

2°. de conducteurs isolés .

Ces 2 cas sont en effet assez différents et demandent chacun une étude spéciale.

— 1er cas — Conducteurs nus. — Rappelons d'abord la formule générale de la résistance d'un conducteur

$$R = \frac{\alpha l}{s}$$

α étant la résistance spécifique du métal dont est formé le conducteur,

l sa longueur,

s sa section,

Cette formule peut s'écrire :

$$R = \frac{\alpha l^2}{s l}$$

Or le produit sl est l'expression du volume V du conducteur et si nous multiplions l'expression par la densité d du métal, le produit Vd exprimera le poids du conducteur

$$R = \frac{\alpha l^2}{V} = \frac{\alpha l^2 d}{V d} = \frac{\alpha l^2 d}{P}$$

Or le produit αd est constant pour un même métal, nous tirons donc :

$$R = K \frac{l^2}{P}$$

expression qui nous montre que la résistance d'une ligne est en raison directe du carré de la longueur et en raison inverse du poids. Pour le cuivre, on prend habituellement K = 150.

$$\text{d'où} \quad R = \frac{150\, l^2}{P}$$

Dans cette formule l est exprimé en Km et P en Kg.

Cherchons maintenant le poids de la ligne. Nous aurons, en remarquant que la longueur totale de la ligne égale $2l$.

$$R = \frac{aV}{100\, ni} = \frac{K\, 4\, l^2}{P}$$

$$\text{d'où} \quad P = \frac{400\, K\, n\, i\, l^2}{aV}$$

On a l'habitude de caractériser une lampe par son voltage V et la puissance en watts W qu'elle dépense, on a :

$$W = Vi$$

Introduisons cette valeur dans la formule précédente :

$$P = \frac{400\, K\, n\, W\, l^2}{aV^2}$$

en remplaçant K par sa valeur

$$P = \frac{60000\, n\, W\, l^2}{aV^2} \quad (1)$$

Cette formule donne le poids d'une ligne de cuivre destinée à alimenter n lampes de W^{watts} chacune, sous le voltage V et en tolérant une perte de volts de $\frac{\alpha V}{100}$. Nous pouvons résoudre l'équation (1) par rapport à la longueur

$$l = \sqrt{\frac{P \alpha V^2}{60000\ n\ W}} \quad (2)$$

ce qui nous donne la distance maxima qu'on peut atteindre dans les mêmes conditions avec un poids P de cuivre.

La 1ère de ces formules nous montre encore que le poids et par suite le prix sont proportionnels au nombre de lampes et au carré de la longueur; par suite les grandes distances sont onéreuses.

Si nous désignons par P_1 le poids de cuivre par lampe on aura:

$$P_1 = \frac{P}{n} = \frac{60000\ W\ l^2}{\alpha\ V^2} \quad (3)$$

et

$$l = \sqrt{\frac{P_1\ \alpha V^2}{60000\ W}}$$

Nous pouvons maintenant nous proposer de résoudre la question suivante:

Quelle est la plus grande distance à laquelle

on peut alimenter des lampes à incandescence en s'imposant une dépense de cuivre déterminée par lampe ?

Cette question est résolue par l'équation (4)
Supposons par exemple qu'il s'agisse de lampes de 10 bougies dépensant 4 watts par bougie, sous une tension de 110 volts, que nous tolérions une perte de 5 % et que nous employions 5 kg de cuivre par lampe, on a alors :

$P_1 = 5^k \quad a = 5 \quad V = 110 \quad W = 40$

On trouve l = 355 mètres, alors que, pour une dépense de cuivre double soit 10 kg. la distance maxima serait 501 m.

Cas — Conducteurs isolés. — La question se présente différemment pour les câbles isolés. En effet, le prix d'un câble en cuivre nu est simplement proportionnel au poids, tandis que pour les câbles isolés il est loin d'en être ainsi.

Rappelons qu'on a trouvé la relation

$$r = \frac{a\,V}{200\,l\,n\,i}$$

; on connaît donc la résistance kilométrique.

L'observation du catalogue des fabricants

de câbles montre que, en fonction de la résis-
-tance r, le prix par Kilomètre est donné par
l'expression.

$$p = \frac{A}{r} + B$$

Les valeurs A et B sont variables selon la nature de l'isolement du câble.

Ainsi pour un type de câble à isolement fort, fabriqué par la maison Mérieux (1) on trouve $A = 1500$ et $B = 250$, tandis que pour un second type à isolement moyen :

$A = 1500$ et $B = 75$

Le prix par Kilomètre d'un câble présentant une résistance Kilométrique de 10 Ohms sera donc :

1° = isolement fort $p = \frac{1500}{10} + 250 = 400$ f

2° = moyen $p = \frac{1500}{10} + 75 = 225$ f

Dans ce cas voyons comment nous dirigerons les calculs :

On a les relations :

$$I = ni \qquad R = 2l\rho$$

$$RI = 2lrni = \frac{aV}{100}$$

$$r = \frac{aV}{200\, l n i}$$

Transportant cette valeur de p dans l'expression précédente (1) du prix kilométrique, il vient :

$$p = \frac{200\, l\, n\, i\, A}{a V} + B$$

La longueur totale de la ligne étant $2l$, le prix total sera

$$P = \frac{400\, l^2\, n\, i\, A}{a\, V} + 2Bl$$

Le prix par lampe sera donc

$$P_1 = \frac{400\, A\, l^2 i}{a\, V} + \frac{2B}{n}\, l$$

Multiplions haut et bas le 1er terme par V, il vient :

$$P_1 = \frac{400\, A\, l^2\, W}{a\, V^2} + \frac{2B}{n}\, l$$

Si nous appliquons cette formule aux 2 types de câbles mentionnés plus haut, il vient :

1er type $P_1 = 1800\, l^2 + \frac{500}{n}\, l$

2e type $P_1 = 1800\, l^2 + \frac{150}{n}\, l$

Nous voyons que dans ce cas le prix par lampe va en diminuant à mesure que leur nombre s'élève. C'est ce qui n'avait pas lieu

pour les câbles à fil nu.

Un régime économique conduira donc à alimenter le plus de lampes possible.

Si nous faisons le calcul pour une lampe placée à 100 mètres on trouve :

$$1^{er} \text{ type } P_1 = 1800 \times \overline{0.1}^2 + 500 \times 0.1 = 68^f$$

$$2^e \text{ type } P_1 = 1800 \times \overline{0.1}^2 + 150 \times 0.1 = 33^f$$

Si l'on installe 500 lampes le prix devient, dans les 2 cas, sensiblement égal à 18^f par lampe.

Une autre remarque à faire, c'est que les 1ers termes étant sensiblement égaux, il y a très peu d'intérêt dans le cas d'un grand nombre de lampes à faire économie sur l'isolement de la ligne.

Prenons maintenant le cas où l'on doit alimenter deux groupes de lampes, l'un de n lampes placées à une distance l, l'autre de n' lampes placées à une distance l'.

1er Cas — Conducteurs nus. — De A en C on aura un courant $I = (n + n')i$.

De C en D un courant $I' = n'i$.

La résistance de la ligne jusqu'au 1er groupe est $2rl$ et la perte en volts $2rl(n+n')i$.

La perte en volts dans la seconde partie est :

$$2rl'n'i$$

Or, la perte totale doit égaler la perte consentie $\frac{aV}{100}$ d'où l'égalité :

$$2rl(n+n')i + 2rl'n'i = \frac{aV}{100}$$

qui nous donnera la valeur de la résistance kilométrique à adopter.

On pourrait encore en fonction du poids écrire :

$$\frac{4kl^2(n+n')i}{P} + \frac{4kl'^2n'i}{P'} = \frac{aV}{100} \quad (1)$$

De plus, si les sections sont les mêmes, on a évidemment :

$$\frac{P}{P'} = \frac{l}{l'} \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) permettent de calculer P et P' et par suite le prix de la ligne.

Nous ferons maintenant une autre remarque :

Il n'est pas logique de donner la même section au conducteur dans les deux parties. Il est visible que cette section doit être plus forte dans la 1ère partie, qui alimente les 2 groupes, que dans celle qui alimente seulement le second. On aura donc 2 types de câbles à employer, ce qui ne constitue pas une grande complication.

Mais alors la perte en volts devient :

$$2\,r\,l\,(n+n')\,i + 2\,r\,l'\,n'\,i$$

et nous n'avons qu'une équation pour deux inconnues r et r'

Des considérations économiques nous permettront de trouver une seconde équation.

Supposons le cas de câbles nus et imposons-nous l'économie maximum de cuivre c'est-à-dire que si P se rapporte à la canalisation du 1er groupe et P' à celle du second on aura la relation :

$$P + P' = \text{minimum}$$

La question est alors la suivante : trouver les deux quantités P et P' reliées entre elles par la relation (1) et de telle sorte que leur somme soit minimum.

Cette question traitée par le calcul différentiel

nous conduit aux résultats suivants pour les poids les plus favorables :

1ère partie $P = \dfrac{4 K l \sqrt{n+n'}\, i\, [\, l \sqrt{n+n'} + l' \sqrt{n'}\,]}{\frac{\alpha V}{100}}$

2e partie $P' = \dfrac{4 K l' \sqrt{n'}\, i\, [\, l \sqrt{n+n'} + l' \sqrt{n'}\,]}{\frac{\alpha V}{100}}$

Connaissant les poids et les longueurs, il sera très facile de déterminer les sections.

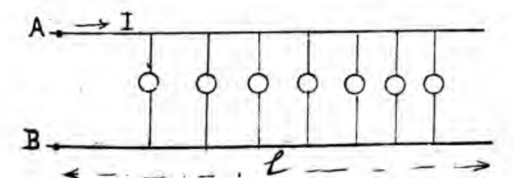
Ainsi voila un cas où le calcul est très utile et indique clairement les meilleures conditions économiques.

2e Cas - Conducteurs isolés — L'emploi de la formule donnée plus haut :

$$p = \frac{A}{r} + B$$

permet de traiter ce cas sans difficulté. Nous laissons au lecteur le soin de le faire.

Nous pouvons maintenant dire quelques mots du cas où les lampes sont réparties sur toute la longueur de la ligne à partir du centre de distribution AB et, pour simplifier, nous supposerons qu'elles sont équidistantes.



A l'origine de la

canalisation on a un courant I qui se répar-
-tit entre toutes les lampes, à la fin le courant est donc réduit à zéro ; On peut donc admettre une valeur moyenne $\frac{I}{2}$.

Si r est la résistance kilométrique

l la distance de la dernière lampe au centre AB, la résistance totale sera $2rl$ et la perte maximum en volts :

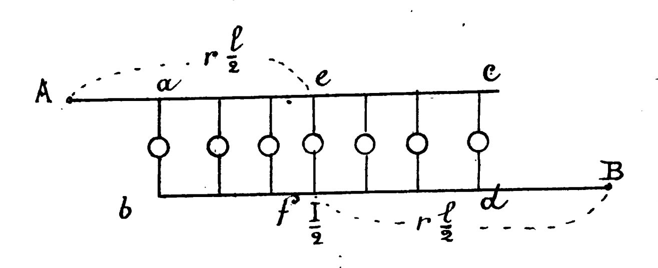
$$2rl\frac{I}{2} = rlI.$$

La 1ère lampe fonctionnant au voltage nor-
-mal, cette expression rlI représente aussi l'écart maximum de tension entre la lampe la plus poussée et la lampe la moins poussée.

C'est ce cas qui figure dans la 1ère colonne du tableau que nous donnons plus loin.

La disposition précédente est simple c'est celle qui se présente le plus naturellement à l'esprit ; mais on peut adopter d'autres dis-
-positions plus avantageuses ; nous en signa-
-lerons quelques-unes.

1° —— La disposition anti-parallèle représentée par la fig. ci-après.



Dans ce cas aucune lampe ne fonctionne au voltage V, mais la différence de voltage, entre les lampes les plus poussées et les lampes les moins poussées, est plus faible que dans le cas précédent.

Pour la 1ère et la dernière lampe la perte est la même elle égale $rl\frac{I}{2}$.

En effet en A l'intensité est I, en C elle est 0, l'intensité moyenne sur AC est donc $\frac{I}{2}$, et la perte est $rl\frac{I}{2}$.

Les lampes extrêmes ab et cd fonctionnent donc au voltage $V - rl\frac{I}{2}$.

Considérons maintenant la lampe du milieu cf: en A, l'intensité est I, au milieu l'intensité est égale $\frac{I}{2}$, l'intensité moyenne est, par suite, égale à $\frac{3I}{4}$. Or, la résistance de a en e est $\frac{rl}{2}$, la perte en volts de a en e est donc $\frac{rl}{2} \times \frac{3I}{4}$; de f en d, la perte en volts serait aussi de $\frac{rl}{2} \times \frac{3I}{4}$. La perte totale pour la lampe ef est donc $rl \times \frac{3I}{4}$. La lampe du milieu fonctionne donc sous le voltage $V - rl \times \frac{3I}{4}$.

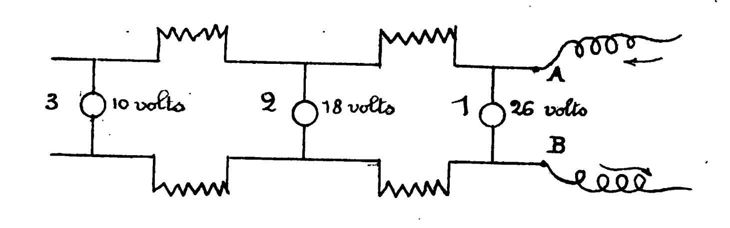
On voit donc que la perte en volts n'est pas uniforme ainsi que beaucoup de personnes le croient encore.

Cherchons l'écart maximum de voltage. Il est égal à $rl \times \frac{3I}{4} - rl\frac{I}{2} = \frac{rlI}{4}$

Ainsi dans le cas de distribution anti-parallèle l'écart maximum de tension entre les lampes est 4 fois plus petit que dans la disposition en parallèle.

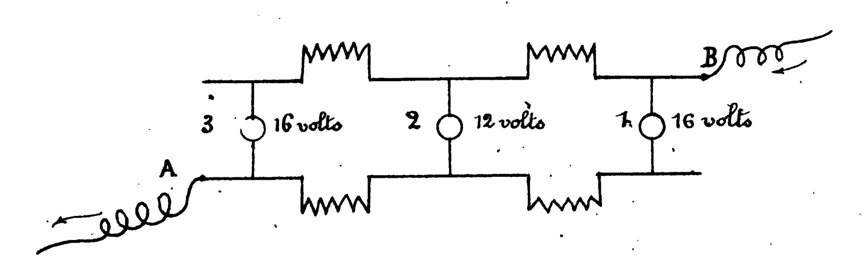
Ces faits peuvent se prouver d'une façon expérimentale en disposant l'expérience de la façon suivante (expérience faite au cours).

Prenons 3 lampes entre lesquelles nous intercalons 2 résistances de maillechort. Si nous prenons le cas de l'alimentation en dérivation simple nous constatons que l'éclat des lampes



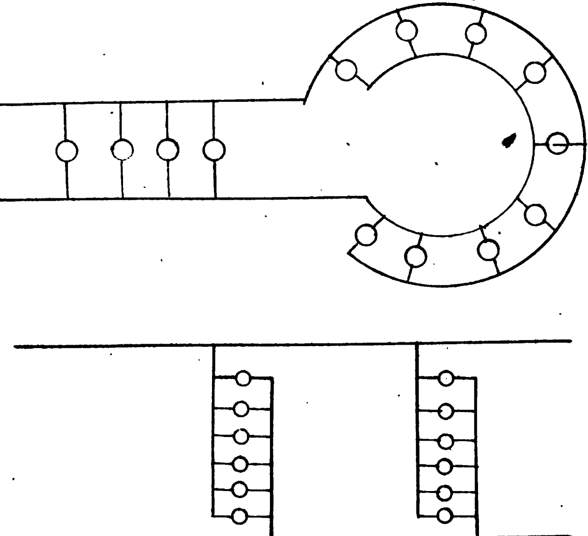
va en diminuant de la 1ère à la dernière. La différence de potentiel mesurée aux bornes de la 1ère est 26 volts, tandis qu'aux bornes de la dernière elle est de 10 volts, l'écart maximum est donc de 16 volts. Au contraire si nous adoptons la dis-

-position anti-parallèle l'éclat des lampes extrêmes est la même, mais il est plus faible pour celle du milieu.



De plus la différence de potentiel aux bornes des lampes extrêmes est de 16 volts, tandis qu'elle est de 12 volts pour la lampe du milieu. L'écart maximum n'est donc plus de 4 volts soit le 1/4 de ce qu'il était dans la première disposition.

Les deux dispositions peuvent se combiner de diverses façons. Voici deux variantes par exemple.

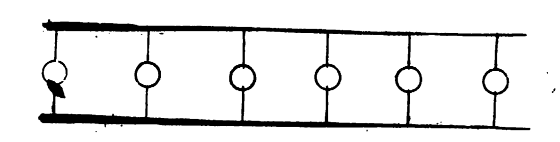


En examinant les systèmes de distribution qui précèdent, on est frappé du fait suivant :

Il n'est pas rationnel d'employer pour les conducteurs une section uniforme puisque l'in-tensité du courant qui les parcourt varie elle-même d'une lampe à l'autre

Le calcul conduit à employer des câbles coniques ce qui serait loin d'être pratique. Ce système aurait l'avantage de pouvoir procurer une densité constante et une meilleure utilisation du poids du métal conducteur.

Dans le cas de distribution conique parallèle, il est facile de voir que le potentiel varie d'une façon uniforme mais que la différence entre les lampes extrêmes est double de ce qu'elle



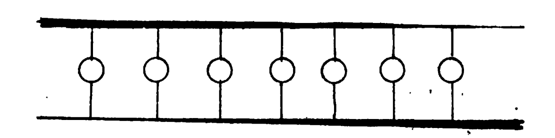
est dans le cas de conducteurs cylindriques.

Ajoutons que cet inconvénient est compensé par une diminution des 2/3 du poids du cuivre.

Enfin si l'on consent la même dépense de

cuivre on peut tripler la section et l'écart maximum devient plus faible que pour les conducteurs cylindriques dans le rapport de 2 à 3.

Mais la solution la plus parfaite nous apparaît dans le cas de distribution conique antiparallèle.



La différence de potentiel aux bornes de tous les appareils récepteurs est alors rigoureusement la même.

Le tableau ci-après résume ces divers résultats.

Alimentation	Câbles	Écart maximum de voltage	Perte de charge entre la source et la lampe la plus poussée	Perte de charge entre la source et la lampe la moins poussée	Rapport des Poids
Parallèle	Cylindriques	$r l I$	zéro	$r l I$	3
Anti-parallèle	- d° -	$\frac{1}{4} r l I$	$\frac{1}{2} r l I$	$\frac{3}{4} r l I$	3
Parallèle	Conique	$2 r l I$	zéro	$2 r l I$	1
Anti-parallèle	Conique	zéro	$r l I$	$r l I$	1

— Stations centrales —

Supposons qu'il s'agisse d'éclairer en dérivation simple à l'aide d'une station centrale un groupe ne présentant pas une très grande étendue.

Soit par exemple un quartier de ville dont le périmètre serait un cercle, l'usine étant placée au centre.

Nous avons vu que, dans le cas d'un seul groupe de lampes, en admettant une dépense de 5 Kilogr. de cuivre par lampe on ne peut pas éclairer à plus de 355^{m} de distance.

Remarquons que, dans le cas qui nous occupe (éclairage à répartir dans un cercle dont l'usine est le centre), les circonstances sont un peu plus favorables.

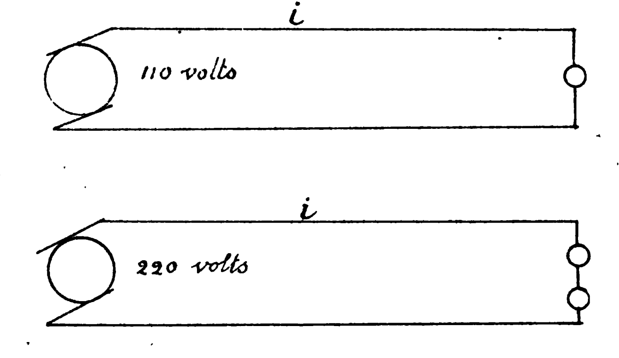
En effet, pour les lampes au-delà du rayon d'action que nous venons d'indiquer, on dépensera un poids de cuivre supérieur à 5 Kg. par lampe. Mais, pour celles qui sont à l'intérieur, la dépense sera plus faible ce qui détermine une certaine compensation qui permet d'étendre le rayon d'action à environ 500 mètres ou plus exactement

$355 \times \sqrt{2}$ (1)

On a cherché à augmenter la distance possible de distribution ou le champ d'action.

Un 1er moyen consiste à élever la tension aux bornes de la source.

Supposons un centre à 110 volts alimentant une seule lampe à une distance l avec un courant d'intensité i. Si l'on double le voltage de la source, avec la même intensité i, on pourra, à la même distance, alimenter 2 lampes en tension.



La perte en volts ne variera pas et, avec la même dépense de cuivre, nous aurons réussi à alimenter deux lampes.

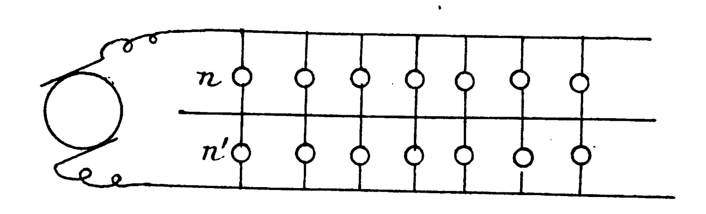
---

(1) La plupart des considérations qui précèdent sont dues à M. Rechniewsky.

Malheureusement avec ce système on retrouve en partie l'inconvénient des distributions en série, qui consiste dans la solidarité des appareils placés dans le circuit ou dans la complication de ces appareils si l'on veut éviter cet inconvénient.

Un moyen très simple permet encore de le supprimer.

Il consiste à réunir par un conducteur auxiliaire les milieux des dérivations ainsi que cela est indiqué ci-dessous.



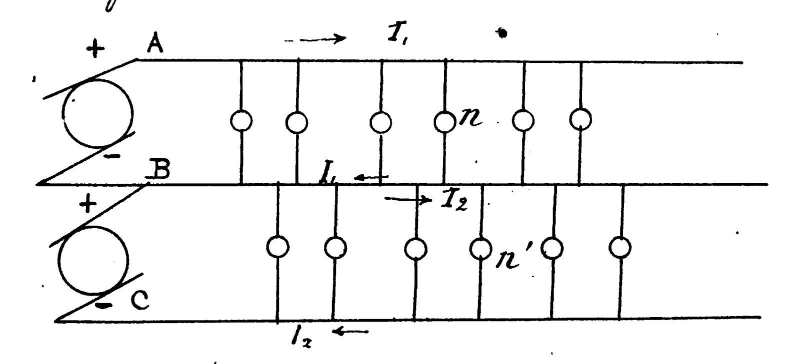
On obtient alors le système dit à 3 fils. Mais, employé sous cette forme simple, il peut donner de graves inconvénients. Si les nombres n et n' des lampes placées de part et d'autre sont différents, il est évident que l'éclat des lampes ne sera pas le même des deux côtés; par suite l'indépendance absolue des foyers n'existe pas. –

Plusieurs moyens ingénieux ont été imaginés

pour tourner cette difficulté.

1° — Distribution à 3 fils d'Edison. — On emploie dans ce cas deux dynamos accouplées en tension, au lieu d'une seule.

S'il s'agit, par exemple, d'alimenter des



lampes à 100 volts, la différence de potentiel entre les lampes A et C sera de 200 volts, entre A et B ou entre B et C elle sera de 100 volts.

Si le groupement des lampes est symétrique c'est-à-dire s'il y en a le même nombre de part et d'autre du fil neutre ou de compensation, ce dernier ne sera parcouru par aucun courant. Mais si cet équilibre n'existe pas, le fil neutre sera parcouru par la différence des courants I_1 et I_2 alimentant respectivement les n et les n' lampes réparties de chaque côté.

On voit donc que la section du fil intermédiaire

peut être notablement réduite puisqu'il est habituelle-
-ment parcouru par un courant beaucoup plus faible que celui qui parcourt les conducteurs extrêmes.

Même en employant la même section pour ces 3 câbles il en résulte une économie notable qu'il est facile de calculer.

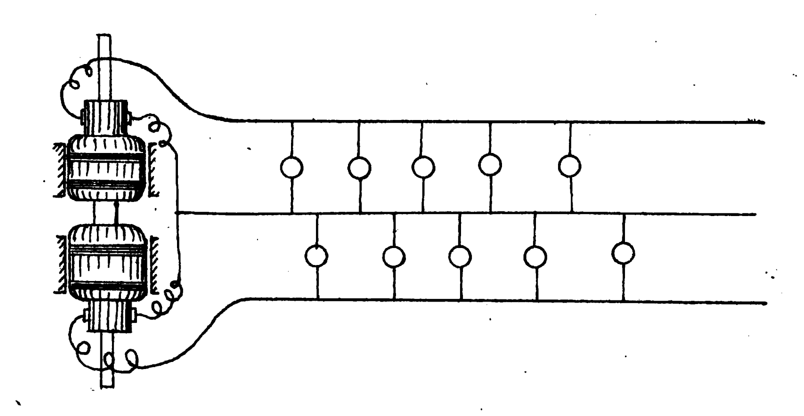
Remarquons en effet que ce système n'est que la superposition de deux distributions en dérivation simple permettant d'économiser un conducteur sur quatre.

Or, la section des câbles peut-être diminuée de moitié puisque la f. e. m. est doublée, par suite le cuivre employé sera, dans ce cas, les $\frac{3}{8}$ de ce qu'il serait en employant 2 groupes à deux conducteurs, en supposant que la section du conducteur intermédiaire reste la même que celle des extrêmes.

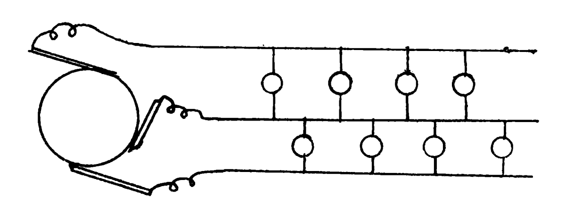
La sujétion d'avoir deux dynamos en fonction a pu être éludée de plusieurs façons.

On peut, par exemple, employer une seule dynamo dont l'induit est muni de deux enrou-
-lements (sur la fig. on a pour plus de clarté représenté deux enduits montés sur le même arbre ce qui revient au même) une telle disposition existe dans l'installation

de Domène, étudiée dans le cours de l'année dernière

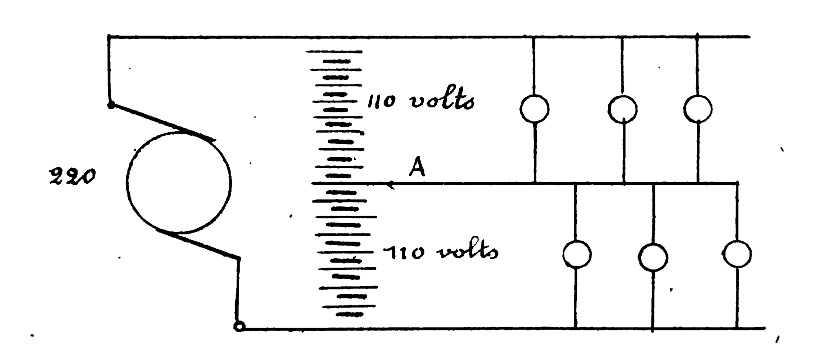


On peut encore adopter la disposition suivante proposée par Muller et consistant à placer 3 balais sur le collecteur d'une dynamo ordinaire, mais il faut dans ce cas prendre des précautions spéciales pour éviter les étincelles au collecteur.



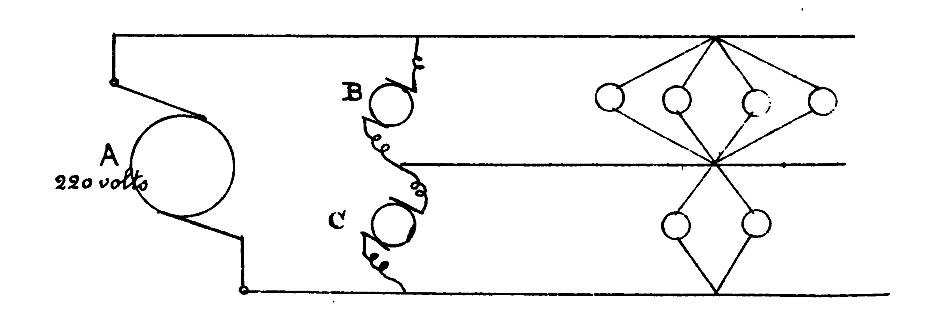
Enfin, les deux dispositions suivantes sont plus originales : 1° — On place en dérivation une batterie de 200 ou 220 volts chargée par une

seule dynamo. Le fil neutre est alors branché en



A au milieu de la batterie d'accumulateurs. Cette dernière sert évidemment de régulateur pour l'éclairage;

2°— On peut employer un système de compensateur imaginé par Elihu Thompson. On



emploie une seule dynamo A de 220 volts par exemple; B et C sont des dynamos de puissance beaucoup plus faible mais complètement solidaires,

leurs induits peuvent, par exemple, être montés sur le même arbre.

Ces dynamos, lorsque la symétrie existe des deux côtés du fil neutre, sont parcourues par un faible courant qui les actionne comme réceptrices. Quand la charge augmente d'un côté et diminue de l'autre, l'induit situé du côté le moins chargé devient moteur et l'autre générateur. L'excès de courant peut donc ainsi être balancé.

Ce système est surtout employé pour les distributions à plus de trois fils, 4, 5, 6 par exemple.

Distribution à 5 fils — Le système de distribution précédent peut être généralisé, en employant un nombre quelconque n de dynamos reliées à deux conducteurs principaux extrêmes et $n-1$ conducteurs intermédiaires.

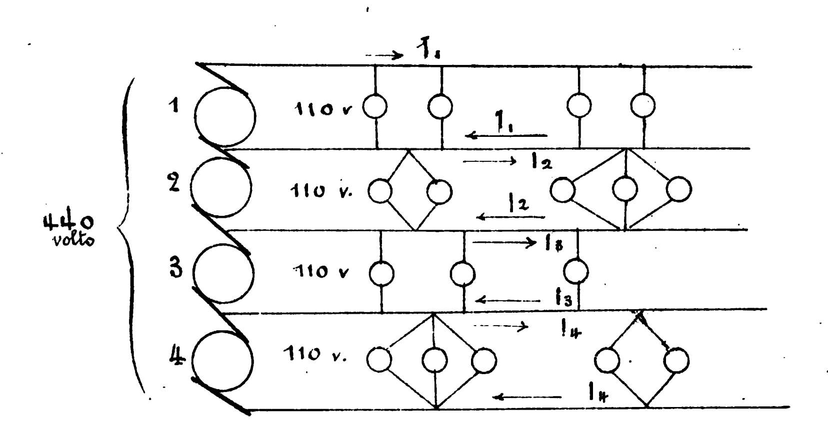
Si l'on désigne par P le poids du cuivre nécessaire pour constituer les n distributions en dérivation simple qu'on pourrait obtenir avec les n dynamos, le poids de cuivre nécessaire pour la distribution à conducteurs multiples est exprimé par la fraction

$$\frac{n+1}{2n} \times \frac{1}{n} P = \frac{n+1}{2n^2} P$$

Le système à cinq fils a été employé en particulier pour le secteur de la place Clichy à Paris.

Un exemple récent existe d'ailleurs dans notre région, à St Geoire, et a été installé par M. M. Brenier et Cie.

La fig. ci-dessous indique le groupement des dynamos et des appareils récepteurs.



On voit que les conducteurs extrêmes sont parcourus par la totalité des courants tandis que les conducteurs intermédiaires sont parcourus par des différences de courant qui s'annulent si la répartition est symétrique.

On peut, de même que pour le système à 3 fils, n'employer qu'une dynamo, soit en plaçant une batterie d'accumulateurs de 440 volts, soit

en employant le système à compensateurs de Thomson.

La distribution à 5 fils permet d'étendre jusqu'à 1600 mètres le rayon d'action en supposant comme précédemment une dépense de 5 Kg. de cuivre par lampe.

Cette disposition nécessite évidemment un meilleur isolement des circuits en raison de la tension relativement élevée qui existe.

Les systèmes de distribution que nous venons d'étudier ne sont applicables qu'aux réseaux de peu d'étendue. Au-delà des limites que nous avons indiquées il convient d'employer d'autres systèmes qui feront l'objet de la prochaine leçon.

11.e Leçon

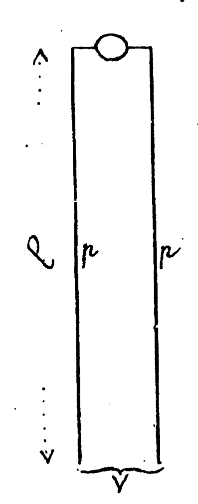
Distributions électriques (Suite)

Nous avons, dans la précédente leçon, indiqué le principe sur lequel repose la distribution à 3, 4 et 5 fils.

Voyons quels avantages on peut retirer de ce système, au point de vue purement économique.

Reprenons une distribution en dérivation simple alimentant une seule lampe à une tension V.

Le circuit se compose de 2 conducteurs de même longueur l et de même résistance; soit p le poids d'un de ces conducteurs.



La résistance totale de la ligne est :

$$R = \frac{K L^2}{P}$$

ou, en remarquant que

la longueur totale $L = 2l$ et le poids $P = 2p$

$$R = \frac{K\,4l^2}{2p} = \frac{2Kl^2}{p}$$

Si i est l'intensité nécessaire au fonctionnement de cette lampe, la perte en volts sera

$$Ri = \frac{2Kl^2 i}{p}$$

Nous avons dit que cette perte était soumise à une certaine tolérance qui ne pouvait dépasser une certaine fraction $\frac{a}{100} V$ que nous désignerons pour simplifier par m

Nous aurons donc

$$Ri = \frac{2Kl^2 i}{p} = m$$

d'où

$$p = \frac{2K \cdot l^2 i}{m}$$

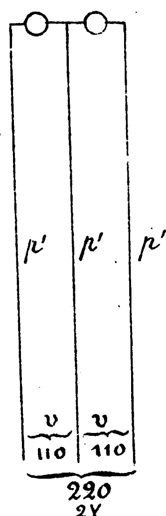
Par suite le poids total sera

$$P_1 = 2p = \frac{4Kl^2 i}{m}$$

par lampe.

Prenons maintenant le cas d'une distribution à 3 fils. Dans les circonstances les plus défavorables, toutes les lampes peuvent être éteintes d'un côté alors qu'elles sont toutes allumées de l'autre; d'où la nécessité de donner au fil neutre une section égale

à celle des deux autres. En général on s'arrange pour que ce cas particulier d'extinction ne se présente pas et l'on cherche à équilibrer autant que possible, le nombre de lampes en fonction. Dans cette hypothèse, on donne habituellement au fil neutre une section 2 fois moindre qu'aux conducteurs extrêmes.



Prenons le cas le plus défavorable: celui où les 3 conducteurs sont égaux, pèsent le même poids p' et alimentent 2 lampes de même voltage et de même intensité que précédemment

Supposons que les 2 lampes fonctionnent simultanément, la résistance du circuit formé par les fils extrêmes est :

$$R' = \frac{2kl^2}{p'}$$

la perte de charge

$$R'i = \frac{2kl^2}{p'}\, i$$

Le potentiel d'alimentation étant 2V cette perte de charge doit égaler $\frac{a}{100}\, 2V$, par suite :

$$R'i = \frac{2kl^2}{p'} i = \frac{\alpha}{100} 2V = 2m$$

d'où

$$p' = \frac{kl^2 i}{m}$$

Le poids total de la ligne est donc $3p' = \frac{3kl^2 i}{m}$ et comme il alimente 2 lampes le poids par lampe est :

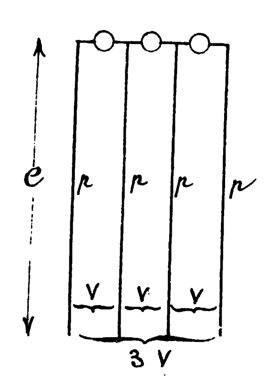
$$P'_1 = \frac{3kl^2 i}{2m}$$

Comparant ce poids P'_1 au poids P_1 du cas précédent, on a le rapport :

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{\frac{3}{2}\frac{kl^2 i}{m}}{4\frac{kl^2 i}{m}} \quad \frac{3}{8}$$

L'emploi du système à 3 fils procure donc une économie de $\frac{5}{8}$ alors même que l'on conserve au fil neutre la même section qu'aux fils extrêmes.

Nous opérerions de même pour une distribution à 4 fils nécessitant trois dynamos et nous aurions successivement :



$$R = \frac{k4l^2}{2p} = \frac{2kl^2}{p}$$

$$RI = \frac{2 k l^2}{p} I = \frac{a}{100} 3V = 3m$$

d'où $p = \dfrac{2 k l^2}{3m} I$

$4p = \dfrac{8 k l^2}{3 m} I$ pour 3 lampes et pour 1 lampe :

$$P'_1 = \frac{8 k l^2}{9 m} I$$

Comparant au poids par lampe dans une distribution à deux fils :

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{\frac{8}{9} \frac{k l^2 I}{m}}{4 \frac{k l^2 I}{m}} = \frac{2}{9}$$

L'économie est donc dans ce cas de $\frac{7}{9}$

Enfin pour une distribution à 5 fils et 4 dynamos on aurait encore :

V V V V

4V

$$R = \frac{k 4 l^2}{2p} = \frac{2 k l^2}{p}$$

$$RI = \frac{2 k l^2}{p} I = \frac{a}{100} 4V = 4m$$

$$p = \frac{k l^2 I}{2m}$$

$5p = \dfrac{5 k l^2 I}{2m}$ pour 4 lampes.

et par lampe :

$$P'_1 = \frac{5 k l^2}{8m} I$$

Comparant au poids par lampe dans une distribution à 2 fils :

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{\frac{5}{8} \frac{k l^2 I}{m}}{4 \frac{k l^2}{m} I} = \frac{5}{32}$$

L'économie est donc dans ce cas de $\frac{27}{32}$.

Dans l'établissement du système à 3 fils, la Cie Edison place habituellement le fil neutre en com-munication avec la terre. Cette pratique est jus-tifiée par la considération suivante :

Entre le fil neutre et chacun des fils existe une différence de potentiel de 110 volts ; par conséquent si l'un des fils extrêmes est mis accidentellement en communication avec la terre il se produit une dif-férence de potentiel de 220 volts qui peut donner lieu à des pertes par dérivation assez considérables et par suite à une rupture de l'isolant. Or, en plaçant le fil neutre à la terre, on réduit la différence de potentiel possible à 110 volts et les chances de rupture de l'isolant sont diminuées. Mais les canalisa-tions électriques ne sont pas les seules à protéger : il faut songer aussi aux canalisations de gaz : lorsqu'un tuyau de conduite métallique se trouve dans le voisinage d'un conducteur négatif pré-sentant une perte, la conduite joue le role d'élec-trode positive et est rapidement attaquée par l'oxygène, le chlore, etc..., provenant de l'électro-lyse des sels contenus dans la terre : il en résulte des fuites de gaz dont l'origine peut paraître très

mystérieuse si on ne tient pas compte de ces circonstances ; à ce point de vue il vaudrait mieux placer le négatif à la terre : les conduites de gaz en cas de perte, joueraient alors le role d'électrode négative et seraient protégées.

Les remarques qui précèdent ont été faites par M. Picou mais il semble que l'usage de placer le fil neutre à la terre a prévalu jusqu'ici.

Nous avons expliqué dans la leçon précédente comment on peut, à l'aide de compensateur, éviter la sujétion de deux dynamos.

Prenons le cas où les lampes sont en nombre variable de part et d'autre : n d'un côté et n' de l'autre par exemple. Poussons, un peu plus loin que dans la leçon précédente, le calcul du compensateur.

Soit E la différence de potentiel entre les conducteurs extrêmes et supposons qu'on soit arrivé à égaliser la différence de potentiel de chaque côté du fil neutre et qu'on ait obtenu $\frac{E}{2}$.

Imposons-nous la condition que la puissance fournie se retrouve dans la totalité des lampes.

On aura :

$$EI = nei + n'ei$$

e et i étant le voltage et l'intensité nécessaires au fonctionnement d'une lampe.

Or $e = \frac{E}{2}$

Donc $EI = \frac{E}{2} i \, (n + n')$

d'où $I = \frac{(n + n')\, i}{2}$

$\frac{n+n'}{2} i$ → A → ni

$\frac{n-n'}{2} i$ ↑ (M) Génératr.

$(n-n')i$ ←

n lampes

$\frac{n-n'}{2} i$ ↓ (N) Réceptrice

n' lampes

← $\frac{n+n'}{2} i$ B ← $n'i$

$n > n'$

A partir du point A on doit avoir un courant ni, il faut donc faire arriver un courant

$ni - \frac{(n+n')\, i}{2} = \left(\frac{n-n'}{2}\right) i$

Il suffirait de brancher une dynamo auxiliaire M fonctionnant comme génératrice et ajoutant son courant.

Au point B on ne doit avoir que $n'i$ il faut donc faire arriver en ce point un courant égal à $\left(\frac{n-n'}{2}\right) i$ sous la même différence de potentiel, et qui pourra être utilisé à alimenter une réceptrice N.

La puissance dépensée dans la génératrice sera plus grande que celle recueillie dans le moteur.

En effet, supposons, pour simplifier, les machines auxiliaires M et N semblables, et soit r leur résistance intérieure. Posons $\frac{n-n'}{2} i = I'$.

Soit P la puissance dépensée pour faire tourner la génératrice M. On a :

$$P = rI'^2 + eI'$$

Soit P' la puissance recueillie à la réceptrice, on a :

$$P' = eI' - rI'^2$$

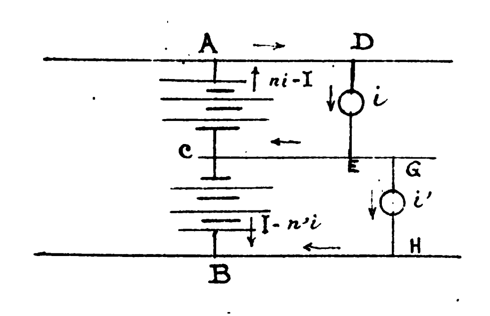
On voit que $P > P'$. Si donc nous employons la réceptrice N à actionner la génératrice M, nous devrions en plus, pour avoir une solution rigoureuse du problème, c'est-à-dire un équilibre parfait dans l'éclairage quel que soit le nombre de lampes allumées, fournir à la génératrice une puissance supplémentaire $P - P' = 2r\left(\frac{n-n'}{2}i\right)^2$ ce qui n'est pas pratique en raison de l'éloignement des points A et B de l'usine et par suite de l'impossibilité, ou tout au moins de la difficulté, d'avoir de la force motrice en ces points. Contentons-nous dès lors d'actionner la génératrice seulement par la dynamo motrice : nous n'avons qu'une solution approchée, mais qui pourra être suffisante dans la pratique.

Cette puissance auxiliaire P - P' serait d'autant

plus faible que la résistance r serait-elle-même plus petite.

Nous devons donc prévoir que si nous nous dispensons de fournir cette puissance auxiliaire l'équilibre sera d'autant plus parfait que cette résistance r sera plus faible.

Examinons le cas d'un système compensateur formé de 2 dynamos ayant leurs induits solidaires c'est-à-dire montés sur le même arbre. Ces 2 dynamos auront des f.e.m. et contre-électromotrice égales. Pour faciliter l'intelligence de ce qui va suivre supposons que des piles soient substituées aux dynamos, ces piles produisant un courant dans le sens indiqué par les flèches.



Nous appliquerons à chacun des circuits la loi de Kirchoff (1) et l'on aura :

$$E' = \underbrace{Ri}_{1^{re}\ \text{lampe}} + \underbrace{r(ni - I)}_{\text{rés. int}^{re}}$$

$$E' = Ri' - r(I - n'i)$$

(1) - Cette Loi s'énonce ainsi :
Dans un circuit fermé la somme algébrique des f.e.m. intercalées dans le circuit est égale à la somme algébrique des produits des intensités par les résistances. Pour donner un signe on parcourt le périmètre du circuit et l'on donne le même signe aux f.e.m. qui agissent dans le même sens.

En retranchant les deux expressions l'une de l'autre

$$0 = rni - rn'i' + R(i - i')$$

Remplaçant i par sa valeur $\frac{e}{R}$

et i' par .. – .. $\frac{e'}{R}$

$$0 = \frac{r}{R} ne - \frac{r}{R} n'e' + e - e'$$

ou $e\left(1 + \frac{r}{R} n\right) - e'\left(1 + \frac{r}{R} n'\right) = 0$

Or on a la seconde équation $e + e' = E$

d'où nous tirons $e' = E - e$.

Par suite $e\left(1 + \frac{r}{R} n\right) = E - e\left(1 + \frac{r}{R} n'\right)$

$$e\left(2 + \frac{r}{R} n + \frac{r}{R} n'\right) = E\left(1 + \frac{r}{R} n'\right)$$

d'où $e = \dfrac{E\left(1 + \frac{r}{R} n'\right)}{2 + \frac{r}{R} n + \frac{r}{R} n'}$ (1)

On aurait de même :

$$e' = \frac{E\left(1 + \frac{r}{R} n\right)}{2 + \frac{r}{R} n + \frac{r}{R} n'} \quad (2)$$

Retranchons les égalités (1) et (2) il vient :

$$e - e' = \frac{E}{2} \frac{\frac{r}{R}(n - n')}{1 + \frac{r}{R}(n + n')}$$

d'où

$$\frac{e - e'}{\frac{E}{2}} = \frac{\frac{r}{R}(n - n')}{1 + \frac{r}{R}(n + n')}$$

Or, le

Or, le second terme ne serait nul que pour $r = 0$ c'est-à-dire s'il n'y avait pas de résistance intérieure dans les deux induits du compensateur ce qui est une condition irréalisable.

La distribution ne se fait donc pas sous le même potentiel $\frac{E}{2}$. La différence sera d'autant plus faible que le rapport $\frac{r}{R}$ sera lui-même petit.

On voit donc par là qu'il y aurait également intérêt à employer des lampes de haut voltage qui présentent une résistance plus grande.

On peut faire une application numérique et poser la condition que :

$$\frac{e - e'}{\frac{E}{2}} = 0.01$$

Prenons un réseau ayant $n = 400$ lampes d'un coté et $n' = 200$ lampes de l'autre.

on posera :

$$\frac{\frac{r}{R}(n - n')}{1 + \frac{r}{R}\left(\frac{n - n'}{2}\right)} = 0.01$$

et comme $n - n' = 200$

et $\frac{n + n'}{2} = 300$

il vient :

$$\frac{200\,\frac{r}{R}}{1 + 300\,\frac{r}{R}} = 0.01$$

$$200 \frac{r}{R} = 0,01 + 3 \frac{r}{R}$$

$$197 \frac{r}{R} = 0.01$$

$$\frac{r}{R} = \frac{0.01}{197}$$

$$\text{ou } r = \frac{R}{19700}$$

C'est-à-dire que pour une lampe présentant une résistance de 197 ohms, la résistance intérieure du compensateur devrait égaler $\frac{1}{100}$ d'Ohm. (1)

Il est évident que cette condition entraînera des difficultés particulières de construction. Si nous nous reportons à la formule donnée dans le cours de l'année dernière

$$E' = \frac{N n \Phi}{10^8}$$

N étant le nombre de spires.

n le nombre de tours.

Φ le flux.

on voit que le nombre de spires N devant être très faible afin de présenter une faible résistance, il s'en suit que la vitesse de rotation devra être aussi grande que possible en même temps qu'on donnera

---

(1) Ces nombres sont de l'ordre de grandeur de ceux que l'on rencontre dans la pratique.

à Φ une très grande valeur.

On voit qu'on peut aller très loin et obtenir pour valeur du rapport $\frac{e - e'}{\frac{E}{2}}$ une quantité très faible car on peut avoir pour n et pour Φ des valeurs très élevées.

En résumé on devra avoir un induit de grand diamètre bobiné, d'un petit nombre de spires, de fil très gros, tournant très vite dans un flux de valeur aussi grande que possible.

On sait que ce système de compensateur est employé à Paris au secteur de la place de Clichy, avec une distribution à 5 fils et 440 volts. Pour ce cas particulier on a :

$$R = 200 \text{ ohms}$$

$$r = 0.016 \text{ —}$$

L'excitation est fournie par le circuit à 440 volts.

Le système à 3 fils n'est pas le seul qui puisse être utilisé pour permettre l'emploi d'une tension de 220 volts.

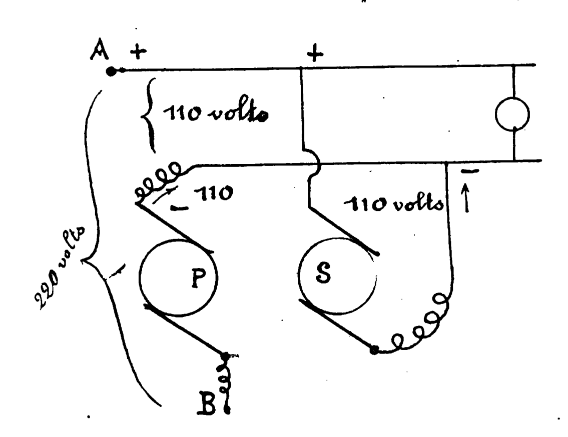
M. Bechniewski a indiqué l'année dernière un système très ingénieux reposant sur l'emploi des transformateurs à courant continu.

Un transformateur de ce genre comporte un anneau muni de deux enroulements différents.

composés ordinairement, l'un de fil gros et l'autre de fil fin. Si les enroulements sont égaux, il n'y a pas de transformation produite.

M. Rechniewski emploie un transformateur ainsi construit (à deux enroulements identiques) et arrive, dans un circuit à 220 volts à distribuer à 110 volts le courant à 2 fils.

On place un transformateur à courants continus pouvant fonctionner à 110 volts[1]. Il est évident que le secondaire du transformateur donnant un courant de 110 volts pourra être branché en quantité sur le précédent. Sur l'energie totale disponible dans la ligne, la moitié est donc fournie par le courant principal et l'autre moitié par le secondaire.



En résumé, étant donnés 2 points A et B présentant entr'eux une différence de potentiel de 220 volts, le système Rechniewski consiste à actionner un transformateur P absorbant 110 volts, le secondaire S, solidaire du premier fournit un courant également à 110 volts

(1) de telle sorte que, à la sortie on ait 110 volts

et qu'on peut accoupler en quantité avec le circuit primaire.

L'avantage de cette combinaison des circuits primaire et secondaire c'est que le transformateur est moitié moins grand et que la dépense de transformation est réduite de moitié puisque la transformation ne porte que sur la moitié de l'énergie disponible à la station.

En raison de cette circonstance le rendement est avantageux.

Ce système peut également s'appliquer à une distribution à 330 volts, 440 volts, etc...,

Distribution par féeders

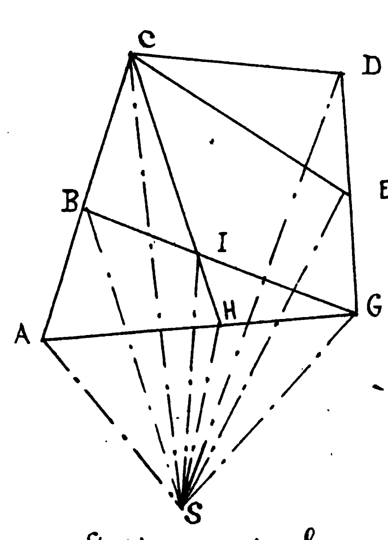
Ce procédé est le plus généralement employé et s'applique spécialement lorsqu'il s'agit de l'éclairage d'une ville ou d'un quartier par une station centrale.

Il a donc pour but d'étendre le rayon d'action d'une station.

Ce système de distribution consiste à couvrir la surface à éclairer d'un quadrillage ou réseau de fils distributeurs. On formera ainsi un

polygone fermé dont les côtés ainsi que les lignes menées à l'intérieur représenteront par exemple les rues d'une ville. La canalisation électrique est représentée par une simple ligne qui constitue le fil positif par exemple, il est facile d'imaginer à côté une seconde ligne qui serait le fil négatif.

Le problème à résoudre consiste à maintenir constante la tension en divers points du réseau.



(Station centrale)

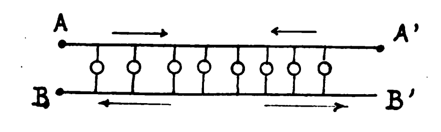
On y arrive en faisant aboutir aux divers sommets A B C D .... des conducteurs spéciaux venant de l'usine et auxquels on donne le nom de _feeders_

Lorsque, à chaque sommet correspond un feeder, ainsi que cela est représenté ci-contre, on dit que le système est _complet_; il est _incomplet_ dans le cas contraire. Le premier est le plus parfait et le plus simple au point de vue du calcul.

Dans le système complet on s'arrange de

de façon à avoir des pertes de charge égales dans tous les feeders ; de cette façon on aura des différences de potentiel égales à tous les centres de distribution. La jonction des féeders aux autres conducteurs se fait au moyen de dispositifs spéciaux appelés boites de raccordement.

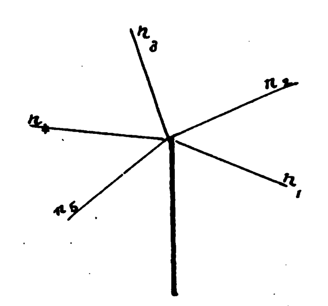
Le calcul d'une telle distribution ne présente pas de difficulté ; ce calcul comprend 2 parties : calcul des conducteurs du réseau (conducteurs de distribution) et calcul des feeders (conducteurs d'alimentation)



1° — <u>Calcul des conducteurs de distribution</u> — Un conducteur de distribution tel que BI (fig. de la page 332) aboutit toujours à deux centres de distribution B et I. Si les lampes sont conformément réparties, on peut admettre que chacun des centres de distribution fournit la moitié du courant ; soient AB, A'B' les deux centres de distribution (fig. page 333 ci-dessus). Le calcul des conducteurs AA', BB' se fera à peu près comme dans le cas d'une distribution en dérivation simple (voir plus haut) ; nous laissons au lecteur

le soin de faire ce calcul dans chaque cas particulier qui pourra se présenter.

2° — Calcul des féeders — Considérons un féeder arrivant en un point A et alimentant par exemple 5 branchements ; soient n_1 n_2 n_3 n_4 n_5 les nombres de lampes contenues sur ces branchements et soit $\underline{i}$ le courant caractéristique d'une lampe. En vertu de ce qui précède, le féeder devra fournir un courant :



$$I = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5)\ \frac{i}{2}$$

On connaîtra ainsi les intensités dans chaque feeder.

Soient alors R, I, R' I' les résistances et les intensités pour chacun des feeders. Pour avoir la même perte en volts $\underline{m}$ qui peut, dans ce cas, être beaucoup plus élevée et atteindre 15 à 20 %, on devra avoir :

$$RI = R_1 I_1 = R_2 I_2 \text{ etc..,} = \underline{m}$$

Remplaçant la résistance par sa valeur en fonction de la longueur et du poids :

$$\frac{a L^2}{P} I = \frac{a L_1^2 I_1}{P_1} = \dots \quad m$$

Connaissant I . I_1 . I_2 on calculera très facilement la résistance, la section et le poids des feeders.

Nous ajouterons qu'il y a toujours intérêt à avoir un réseau complet ou au moins à multiplier autant que possible le nombre des feeders ; la dépense n'est pas sensiblement augmentée car leur section est diminuée, ce qui établit une sorte de compensation. Si tous les feeders avaient même longueur, la compensation serait rigoureuse.

Dans le cas où le réseau n'est pas complet les calculs deviennent très compliqués.

Un bon procédé expérimental consiste à construire, à une échelle réduite, un plan de la ville à éclairer, dans lequel les conducteurs et les feeders sont remplacés par des fils de maillechort dont on modifie les sections de façon à avoir aux centres de distribution des différences de potentiel constantes ; les sections des conducteurs et des feeders devront être dans

le même rapport que celle des fils de maillechort du plan.

Réglage du courant

Le réglage du courant à l'usine doit porter sur deux parties :

1° = les dynamos

2° = les feeders

Le réglage des dynamos s'effectuera en faisant varier le champ magnétique de façon à mainte-nir constante la différence de potentiel aux bornes. Les dynamos seront toutes accouplées en quantité et réglées de façon à ce que les volts soient constants. On fait alors varier le nombre de dynamos selon les besoins du service.

Le réglage des feeders consiste à faire varier leur résistance ; pour cela on peut installer sur chacun d'eux des résistances variables (rhéostats de feeders)

Ces rhéostats sont le plus souvent formés d'un grand nombre de fils d'un diamètre assez faible qu'on peut relier en quantité et en nombre variable.

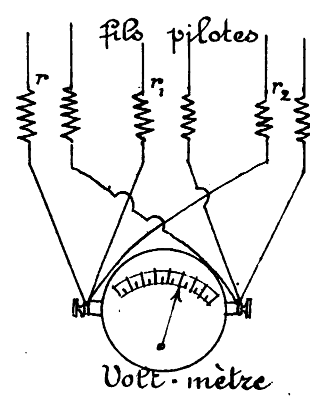
La résistance ne peut être calculée que d'après la plus grande différence que l'on estime pouvoir se produire entre les différents feeders.

Un système de réglage assez fréquemment employé est réalisé par un grand nombre de feeders aboutissant, autant que possible, aux croisements des fils du réseau. Le réglage con-siste alors à proportionner le nombre de feeders en action, au débit de l'usine; on supprime un certain nombre de feeders quand le débit diminue, en les choisissant de façon à main-tenir la répartition aussi uniforme que possible. On peut alors obtenir la condition que les feeders soient parcourus par un courant sensible-ment constant puisqu'on a la faculté d'aug-menter leur nombre avec le débit. Par suite le voltage doit rester sensiblement constant.

Afin de pouvoir effectuer le réglage en con-naissance de cause, il est nécessaire que le conduc-teur de machines ait à l'usine les indications nécessaires à ce sujet, c'est-à-dire le voltage aux centres de distribution.

Pour cela on ramène à l'usine des fils dits fils pilotes qui sont reliés à un voltmètre. Il faut donc autant de voltmètres que de feeders.

On peut diminuer le nombre de ces appareils en réunissant en quantité les fils de même signe venant des points de jonction. Le volt mètre indique alors le voltage moyen des points auxquels il est relié.



Notons une précaution qu'il y a lieu de prendre dans ce cas. Comme il peut y avoir des différences de tensions aux points d'attaché des fils pilotes, il est bon de placer sur ceux-ci des résistances auxiliaires r, r_1, r_2 négligeables en présence de celle du voltmètre, mais suffisantes pour éviter des accidents aux fils pilotes.

On a encore cherché à éviter l'emploi de fils pilotes. On peut y arriver en observant les voltmètres des dynamos et les ampèremètres des feeders. Connaissant ces deux facteurs on aura la perte en volts RI.

Le voltage au point de jonction du feeder avec le réseau sera égal au voltage de la dynamo moins cette perte de charge.

On pourra dans ce cas avoir un tableau

calculé d'avance.

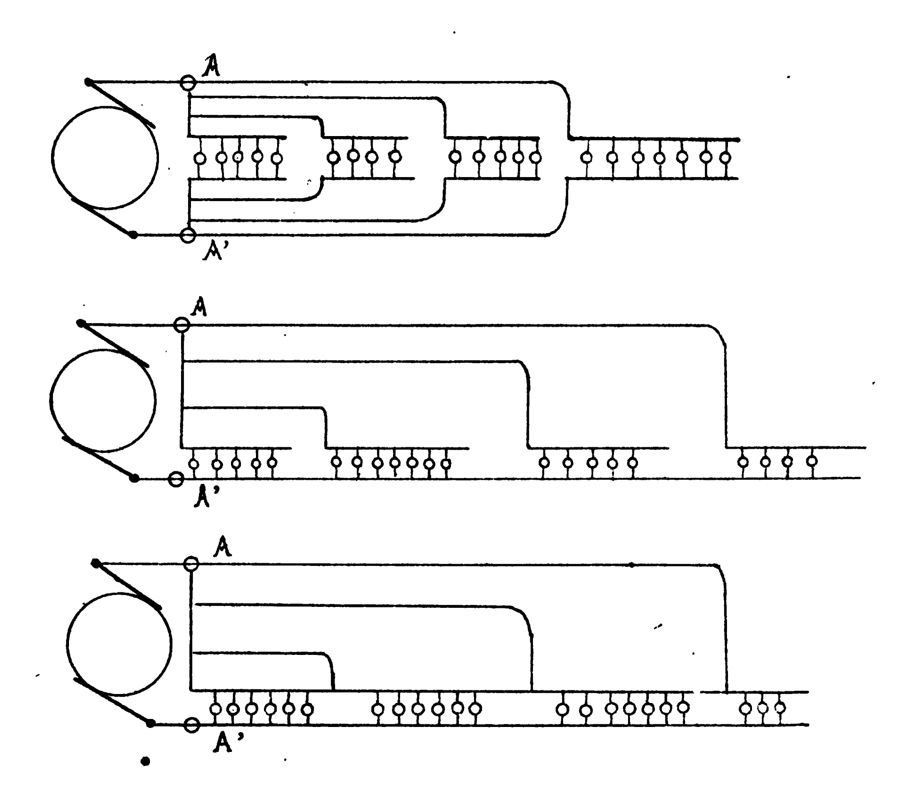
Ces deux observations peuvent même se réduire à une seule à l'aide de voltmètres portant deux enroulements, l'un de fil fin et l'autre de gros fil. Ce dernier doit agir en sens inverse du fil fin en produisant un affaiblissement qui peut-être égal à la perte de charge. Ces appareils peuvent alors donner directement les volts à l'extrémité des feeders.

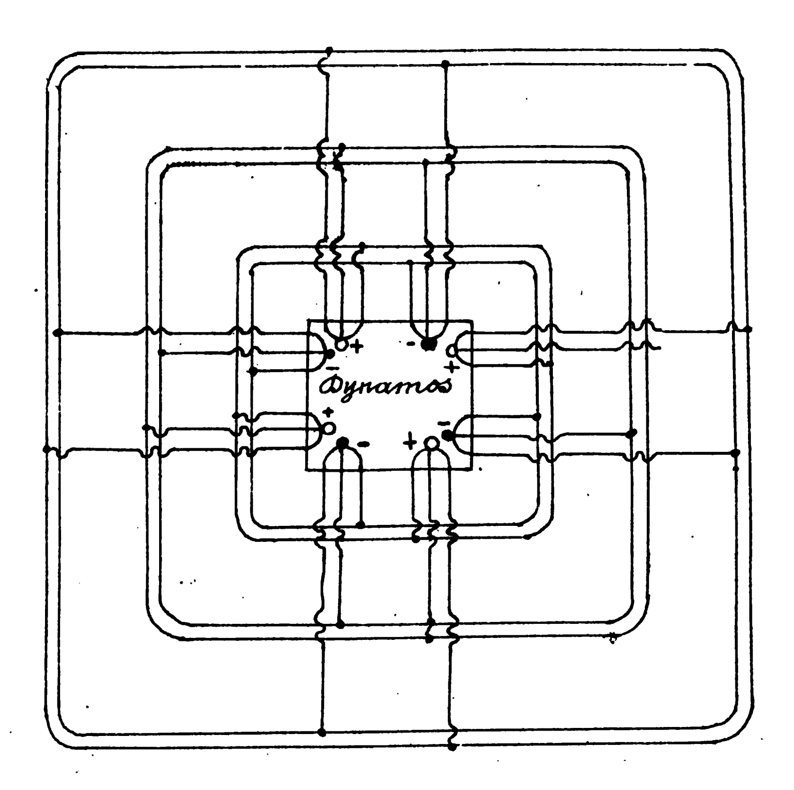
Enfin il existe un moyen automatique, mais malheureusement assez compliqué qui permet de maintenir le potentiel constant et dispense de l'emploi de fils pilotes. Il consiste à employer des sortes de compensateurs au départ des feeders; ils relèvent le voltage d'une quantité égale à la perte subie.

Ils sont essentiellement formés d'un moteur électrique à vitesse constante commandant une dynamo spéciale pouvant transmettre le courant total du feeder et produire les quelques volts auxquels est limitée la perte de charge. Cette dynamo excitée en série par le courant total du feeder, engendre un f.e.m. proportionnelle au courant qui la parcourt et qui vient s'ajouter à la

source initiale pour balancer la perte de charge produite

Les figures qui suivent donnent divers schémas d'installations par feeders.





+
-
-
+
Dynamos
+
-
-
+

13.e Leçon

Electro-Chimie.

L'électro-chimie est l'étude des applications industrielles de l'électricité aux opérations chimiques.

Ces applications sont basées sur la décomposition des corps par le courant électrique.

On sait que la plupart des corps sont des substances composées; l'électricité peut en décomposer un certain nombre.

La première des conditions pour qu'un corps soit décomposé par l'électricité c'est qu'il soit liquide.

Un corps peut-être amené à l'état liquide de deux façons:

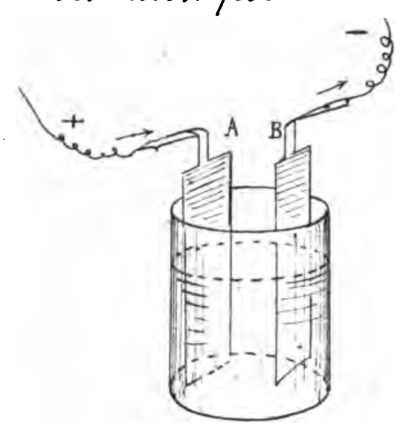
1.° – par fusion;

2.° – par dissolution.

Dans ce dernier cas c'est l'eau qui sert généralement de dissolvant.

Parmi les corps dissous dans l'eau, les sels sont les seuls qui puissent être décomposés.

Cette action a reçu le nom d'électrolyse, le sel décomposé celui d'électrolyte.



Pour électrolyser une dissolution d'un sel on introduit deux plaques conductrices A et B au sein du liquide et on les met en communication avec les pôles d'une source électrique; ces plaques portent le nom d'électrodes.

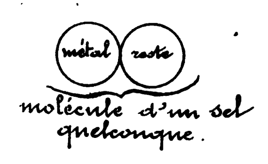
Dans la décomposition il se produit le fait remarquable suivant :

Les produits de la décomposition apparaissent à la surface des électrodes et non dans l'intervalle qui les sépare. C'est là le fait essentiel du passage du courant.

Outre ces actions, il peut s'en produire d'autres, par exemple les produits de la décomposition peuvent agir les uns sur les autres ou sur les électrodes mêmes, mais c'est-là une action purement chimique qui n'a d'électrique que l'origine.

Examinons simplement les phénomènes d'ordre purement électrique. Pour les comprendre nous devrions admettre la conception suivante :

Une molécule de l'électrolyte est composée de 2 parties unies l'une à l'autre ; l'une de ces parties est simplement formée du métal l'autre comprend tout le reste du sel (fig. ci-dessous)



molécule d'un sel quelconque.

Prenons, par exemple, du sulfate de cuivre dont la formule est $CuSO^4$ nous considérerons que chaque molécule de ce sel est formée de deux parties : d'une part le cuivre ; de l'autre le reste SO^4 ; à ce point de vue nous adoptons donc la théorie binaire des sels.

Les deux composants d'une molécule prennent le nom de <u>ions</u> ; l'électrode d'entrée porte le nom d'<u>anode</u> et l'autre le nom de <u>cathode</u>.

Sous l'action du courant la moitié des ions se porte sur une électrode et l'autre moitié sur l'autre. Les ions entraînés dans le sens du courant sont électro-positifs, les autres entraînés en sens inverse sont électro-négatifs. On peut imaginer

que chaque ion électro-positif transporte avec lui dans le sens du courant une petite charge d'électricité positive sur la cathode ; et que chaque ion électro-négatif transporte avec lui, en sens inverse du courant une charge d'électricité négative sur l'anode.

Cette façon figurée de représenter la chose nous explique pourquoi les produits de la décomposition n'apparaissent que sur la surface des électrodes et non dans leur intervalle (fig. ci-contre)

Anode Cathode
+ −
So⁴ So⁴ So⁴
Cu Cu Cu

En résumé si l'on décompose du sulfate de cuivre on verra donc du cuivre à l'état métallique se déposer sur la cathode. On prend pour électrodes des matières non-attaquables par la solution, telles que du platine ou du charbon.

Si l'on prend de l'eau dont la formule est : H^2O l'eau sera décomposée en oxygène et hydrogène, c'est la première décomposition opérée, elle eut lieu vers 1800.

On peut actuellement préparer industriellement de l'oxygène et de l'hydrogène. C'est ce procédé qu'emploie le commandant Renard pour la préparation de l'hydrogène servant au gonflement des ballons du parc aérostatique de Meudon. L'emploi d'électrodes en platine a pu être évité par le commandant Renard qui leur a substitué des électrodes de fer ou de nickel en même temps qu'à l'eau acidulée, il substituait une dissolution de soude. Cette application est susceptible de recevoir des développements. Par exemple, dans la fabrication des accumulateurs, avec récipients en plomb à soudure autogène, on pourrait employer les accumulateurs lors de leur formation à décomposer de l'eau. On produirait ainsi gratuitement de l'hydrogène qui pourrait servir au chalumeau à l'aide duquel on pratique cette soudure.

Examinons maintenant la question au point de vue de la quantité décomposée.

La règle est très simple. Le poids du métal déposé pendant un temps t est proportionnel à l'équivalent chimique du métal et au temps t pendant lequel agit un courant d'intensité i

$$P = Ceit$$

Mais, si i est exprimé en ampères et t en secondes,

it représente la quantité q d'électricité (mesurée en coulombs) qui a passé pendant le temps t : on a donc aussi :

$$P = c e q$$

c est un coefficient,
e l'équivalent chimique,
q le nombre de coulombs

Pour q exprimé en coulombs le coëfficient $c = \frac{1}{96000}$
de sorte que l'on a :

$$P_{grammes} = \frac{1}{96000} eq.$$

Si l'on prend comme unité l'ampère-heure qui vaut 3600 coulombs, la formule devient :

$$P_{gr.} = \frac{3600}{96000} eq$$

ou

$$P_{gr.} = 0.038 \, eq$$

Soit par exemple à trouver le poids de cuivre déposé par ampère-heure, on trouve sur les tables $e = 32$ d'où :

$$P_{gr} = 0.038 \times 32 \times 1 = 1 \text{ gr}.2$$

Un appareil de décomposition constitué comme nous venons de l'indiquer porte le nom de <u>voltamètre</u>.

En général un voltamètre présente une f. e. m. inverse.

La f. e. m. inverse d'un couple n'est autre que la quantité d'énergie chimique fournie par la chute de 1 coulomb.

La différence de potentiel aux bornes d'un voltamètre sera :

$$e = E + rI$$

en multipliant par I

$$\underbrace{eI}_{\text{puissance fournie}} = \underbrace{EI}_{\text{puissance chimique}} + \underbrace{rI^2}_{\text{puissance chaleur}}$$

Voyons maintenant l'effet de la chute de 1 coulomb

Reprenons l'expression :

$$P = \frac{1}{96000} eq$$

On peut dire que 1 coulomb dépose $\frac{1}{96000}$ d'équivalent de cuivre.

Soit Q calories la quantité de chaleur nécessaire pour décomposer 1 équivalent de sulfate de cuivre en Cu et en SO^4. Comme 1 calorie vaut 4.18 joules, la chute de 1 coulomb produira :

$$\frac{Q \times 4.18}{96000} = 0.000043\ Q$$

d'où $E = 0.000043\ Q$

Appliquons au sulfate de cuivre pour lequel on a :

$$Q = 29400 \text{ calories}$$

il vient :

$$E = 0.000043 \times 29400 = 1^{v}.28$$

Ces calculs donnent une idée générale de la f.e.m. mais il ne faut pas attacher une trop grande certitude à ces résultats : on doit les prendre comme une simple indication.

Si les réactions se font sans absorption de chaleur, c'est-à-dire si l'on a par exemple, un voltamètre dont les 2 électrodes sont en cuivre électrolytique on a :

$$E = 0$$

et la quantité d'énergie chimique à fournir est nulle ; ces considérations seront utiles plus loin.

Le résultat essentiel de l'électrolyse est de séparer un métal d'une de ses dissolutions. A ce point de vue cette opération présente donc une certaine analogie avec la métallurgie.

Elle est appliquée en effet pour recouvrir un objet métallique ou non d'un dépôt de métal. Le nickelage, le cuivrage, l'argenture, la dorure

peuvent se pratiquer de cette façon. Cette application a reçu aussi un développement très important sous le nom de galvanoplastie dans la reproduction des œuvres d'art, des clichés d'imprimerie, etc...,

Nous étudierons maintenant une application plus récente à la grande industrie.

Affinage du cuivre

Le principe de la méthode est le suivant :

Si dans un électrolyte de sulfate de cuivre on plonge deux électrodes dont l'une est formée d'une mince lame de cuivre et l'autre d'une plus épaisse, le cuivre de cette dernière pourra se déposer sur la plus mince. Dans ce cas la f.e.m. est, sinon nulle, du moins très faible. Le cuivre ainsi obtenu est chimiquement pur ; il est dit cuivre électrolytique.

Celui qu'on obtient par les traitements purement métallurgiques renferme un grand nombre d'impuretés parmi lesquelles, outre le fer, le zinc, le soufre... on rencontre des métaux précieux tels que l'or, l'argent, etc...

Dans l'électrolyse, les métaux précieux se déposent au fond, tandis que le fer, le zinc ... sont plus gênants

et pourraient même se redéposer à la fin.

Il faut dans ce cas prévoir une certaine préparation du bain. Cette méthode a reçu beaucoup de dispositions différentes dans la pratique.

Procédé Thofehrn

Dans ce procédé les bains comportent un certain nombre de plaques métalliques ; celles de rang pair communiquent ensemble, de même que celles de rang impair.

Ces plaques sont placées dans des bacs en bois doublés de plomb et disposées en deux rangées parallèles légèrement inclinées l'une sur l'autre au bord d'un canal formant caniveau. Les plaques sont supportées par des barres en fer de 4 x 3 c/m. recouvertes de cuivre, qui longent chacune des rangées de bacs.

Nous venons de voir que si on ne prenait pas de précautions le liquide se chargerait de sulfate de fer ou de sulfate de zinc. On s'oppose à cet inconvénient au moyen d'une circulation continue du liquide qui s'effectue à l'aide de pompes.

Le liquide est débarrassé de ses impuretés en le chauffant et en le soumettant à l'action d'un

fort courant d'air chauffé à 35° au moyen de la vapeur. Cet air refoulé par un ventilateur peroxyde le fer qui, étant insoluble, tombe au fond pour être entraîné dans les caniveaux.

Les anodes sont peu à peu détruites et doivent être renouvelées.

Le cuivre est fondu dans des fours spéciaux puis coulé dans des moules; on fait venir de fonte les parties qui servent à les suspendre sur les barres.

Les fours sont desservis par de petits vagonnets roulant sur rails.

Un atelier d'affinage électrique comprend de 100 à 120 bains. On établit un roulement pour le renouvellement des plaques de façon à ne pas immobiliser les bains.

Quand on veut changer les électrodes d'un bac, on le met en court-circuit de façon à ne pas interrompre la marche des autres. Le régime du courant est très important on adopte environ 50 ampères par mètre carré.

L'électrolyte est composé :

de sulfate de cuivre	150
acide	50
Eau	300

Etudions maintenant la question au point

de vue économique.

Soit x le nombre de bains en tension.

P le poids de cuivre à produire par heure.

I l'intensité du courant.

p le poids de cuivre déposé par ampère-heure

En 1 heure le poids de cuivre déposé est pI et pour x bacs

$$P = xpI$$

Quelle puissance faudra-t-il dépenser pour déposer 1 kg. de cuivre par heure.

Soit R la résistance métallique à vaincre (conducteurs et dynamos) r la résistance des bains; e la force contre électro-motrice d'un bac, on a :

puissance dépensée : $W = RI^2 + rI^2 + xeI$

Remarquons que la résistance r des bacs est proportionnelle au nombre x des bains en tension et en raison inverse de la surface totale des électrodes d'un bain :

$$r = \frac{Kx}{s}$$

D'autre part, remplaçons I par sa valeur $\frac{P}{xp}$ on a :

$$W = \frac{RP^2}{x^2p^2} + \frac{Kx}{s} \cdot \frac{P^2}{p^2x^2} + \frac{xeP}{px}$$

Pour produire 1 Kilogr. il faudra dépenser

P fois moins ou

$$\frac{W}{P} = \frac{RP}{x^2 p^2} + \frac{k}{pS} I + \frac{e}{p}$$

La quantité $\frac{I}{S}$ représente la densité d du courant δ on peut donc écrire :

$$\frac{W}{P} = \frac{RP}{p^2 x^2} + \frac{k}{p} d + \frac{e}{p}$$

Examinons cette expression :
Nous avons évidemment intérêt à la rendre la plus petite possible pour dépenser le moins de puissance possible : nous voyons tout d'abord que, à cause du 1er terme, la puissance dépensée par Kg. de cuivre augmente avec la production totale de l'usine : on n'a donc pas, à ce point de vue, intérêt à concentrer toute la fabrication dans un seul circuit ; il vaut mieux, dans le cas de grandes productions, installer plusieurs circuits distincts les uns des autres.

On doit prendre pour x la plus grande valeur possible en réalité, à cause de la remarque précédente, on ne dépasse guère 100 ou 120 bains en tension. R (résistance métallique) doit, bien entendu, être le plus faible possible : le nombre de bains étant fixés, l'équation $I = \frac{P}{xp}$ donne l'intensité à adopter : pour réduire la densité, il faut donc

employer des électrodes ayant une surface aussi grande possible. Ainsi, un grand nombre de bains en tension et des électrodes aussi grandes que possible voila, au point de vue de la dépense d'énergie, les meilleures conditions.

Souvent le 1er terme est négligeable et on peut écrire :

$$\frac{W}{P} = \frac{K}{p} \cdot d + \frac{c}{p}$$

Dans les installations existantes on a en moyenne:

K = 0.002 ohm par m. carré

c = 0.1 volt

D'autre part :

p = 0.001

il vient alors :

$$\frac{W}{P} = 2d + 100 \text{ watts}$$

Pour d = 50, on voit qu'une puissance de 200 watts est nécessaire pour déposer 1 kg. de cuivre par heure.

Mais la question économique ainsi envisa-gée est loin d'être complète : en effet, en général pour ces usines électrochimiques, qui deman-dent de grandes puissances, la force motrice employée est hydraulique, et la question d'écono-

-mie

sur l'énergie dépensée n'est que secondaire : or, en discutant cette question, nous avons été conduit à deux conditions qui amènent de nouvelles dépenses : en effet, la dépense d'installation croît proportionnellement au nombre x des bacs et entraîne un amortissement $m\,x$; et l'accroissement de la surface des électrodes entraîne une augmentation du poids P' de cuivre immobilisé et par conséquent un intérêt annuel $n\,P'$.

Examinons de plus près ce dernier point qui est de la plus haute importance dans le raffinage électrique du cuivre. On a évidemment en prenant des plaques d'épaisseur constante :

$$P' = K'\,x\,S\ ;$$

D'autre part :

$$P = p\,x\,I$$

Divisons membre à membre il vient :

$$\frac{P}{P'} = \frac{p}{K'}\,d$$

On a moyenne $K' = 100$

$$\frac{P}{P'} = \frac{0.001}{100}\,d$$

$$\frac{P}{P'} = 0.00001\,d$$

d'où $P' = \dfrac{P}{0.00001\,d}$

Supposons une usine devant produire 100 Kg. de cuivre à l'heure, prenons $d = 50$ A par m^2, on a :

$$P' = \frac{100}{0.00001 \times 50}$$

$$P' = 200 \text{ tonnes}.$$

Ainsi, dans les conditions où nous nous sommes placés, il faut immobiliser 200 tonnes de cuivre dans une usine capable de produire 2,4 tonnes par jour. On voit combien cette quantité est importante.

En résumé, la dépense annuelle comprend 3 termes principaux :

1° = prix de l'énergie ; 2° = Amortissement de l'établissem^t des Bacs ; 3° = intérêt du capital-cuivre immobilisé.

1° = La quantité d'énergie dépensée pour produire 1 Kg. de cuivre est :

$$\frac{RP}{p^2 x^2} + \frac{K}{p} d + \frac{e}{p}$$ et cette quantité est exprimée en watt-heures.

Soit H le nombre d'heures par an ; la production annuelle est alors HP et la dépense d'énergie :

$$HP \left(\frac{RP}{p^2 x^2} + \frac{K}{p} d + \frac{e}{p} \right).$$

Si A est le prix du watt-heure, la dépense en francs est $AHP \left(\frac{RP}{p^2 x^2} + \frac{K}{p} d + \frac{e}{p} \right)$ ou, en remarquant que $d = K'' \frac{P}{P'}$, $AHP \left(\frac{RP}{p^2 x^2} + \frac{KK''}{p} \frac{P}{P'} + \frac{e}{p} \right)$

2° = L'amortissement des bacs est mx ;

3° = L'intérêt du cuivre immobilisé est nP'. La dépense totale annuelle est donc :

$$AHP\left(\frac{RP}{p^2x^2}+\frac{KK''}{p}\frac{P}{P'}+\frac{e}{p}\right)+mx+nP'$$

Cette expression permet de prévoir la dépense annuelle et de déterminer les meilleures valeurs à choisir pour x et P'.

Il existe actuellement en France 6 usines où l'on produit le cuivre électrolytique.

1° — Usine d'Eguilles. — près Sorgues (Vaucluse) établie en 1891 par M. Mayen.

Le cuivre est d'abord affiné par un procédé analogue à celui employé pour l'acier Bessemer. On emploie un convertisseur analogue modifié par Manhès. Le vent arrive à la surface et le cuivre pur tombe au fond, c'est une opération d'ordre purement chimique.

Le traitement électrolytique a surtout pour but d'extraire l'or et l'argent que contient le métal.

L'usine produit 5 tonnes de cuivre par jour avec un courant de 100 ampères.

2°. — Usine de Biache St Waast. — Elle produit 2000 kg. environ par jour, par désargenture du cuivre et des alliages dorés ou argentés.

3°. — Usine de Pont de Chéruy (Isère). — produit de 12 à 1500 kg. par jour, préparé surtout en vue de la tréfilerie.

L'usine comprend 190 bains en tension exigeant une f. e. m. de 19 volts. Les boues sont reprises et traitées spécialement.

4°. — Usine de Bornel (Oise). — Cette usine a été établie par M. Mayen pour la Compagnie française des métaux et produit environ 600 kg. par jour.

5°. — Usine Richard et Radisson à Lyon. — Cette usine est très intéressante elle est établie spécialement pour traiter les alliages très riches en or et en argent. Elle produit 100 kg. de cuivre et 80 kg. d'or et d'argent.

6°. — Usine de Dives. — Cette usine exploite le procédé Elmore pour la fabrication des tubes sans soudure. On sait que les tubes sans soudure obtenus par

emboutissage sont d'un prix très élevé en raison des frais énormes que cette fabrication nécessite.

Le procédé Elmore consiste à déposer directement par électrolyse du cuivre sur un mandrin tournant.

La densité du courant employé est très élevée 230 ampères par m. carré. Le cuivre ainsi déposé est poreux, peu compact. On lui donne les qualités qui lui manquent en le comprimant fortement à l'aide de galets en agate qui tournent lentement dans le bain. Chacun des points du tube est soumis à cette compression quand une couche de $\frac{18}{1000}$ de m/m s'est déposée.

Quand le dépôt a atteint l'épaisseur voulue, le mandrin est soumis à l'action de la chaleur; le cuivre se dilatant plus que l'acier, le tube se détache du mandrin.

On peut également fabriquer des planches de cuivre par ce procédé.

Il suffit d'obtenir des tubes d'un fort diamètre qui sont ensuite fendus suivant une génératrice, déroulés et laminés à l'épaisseur voulue.

La compression, par galets en agate a été remplacée dernièrement par un martelage à grande fréquence qui parait ajouter à la qualité du métal.

(Procédé Picard & Tanière)

Dans ce procédé, le cuivre se dépose sur un mandrin plombaginé de 1m 40 de long. sur 5 c/m de diamètre. Un marteau en agate mû par un électro-aimant se déplace longitudinalement avec une vitesse d'autant plus grande que la densité du courant est plus élevée : le martelage se reproduit au même point chaque fois que l'épaisseur a augmenté de $\frac{22}{1000}$ m.m.

Voici quelques données numériques :

rotation du mandrin :	76 tours par minute
densité du courant :	300 amp. par m. carré
déplact. longitudinal du marteau }	7 centim. par minute
chocs	800 par minute
Intervalle de temps entre 2 chocs au même point }	40 minutes

Ce procédé peut même être étendu à la fabrication des fils : le tube ainsi obtenu est découpé en spirale et la bande fine que l'on obtient est passée à la filière : le cuivre très ductile peut supporter un grand nombre de passes sans recuit

Cette application particulière de l'électrolyse du cuivre est sans doute appelée à un grand

développement.

Parmi les applications du cuivre électrolytique, une des plus importantes est celle de la fabrication de fils employés en électricité soit pour la construction des dynamos, soit pour les canalisations.

Les cuivres non-électrolytiques fournis par le Commerce sont loin en effet d'avoir la même conductibilité.

William Thomson découvrit, il y a plus de 30 ans, à l'occasion de la réception d'échantillons pour câbles sous-marins, des différences variant du simple au double au point de vue de la conductibilité alors qu'ils présentaient des différences très faibles au point de vue de la composition.

Ainsi la conductibilité était de :

42	pour un échantillon contenant	98.76	% de cuivre
71.3	d°	99.2	-
84.7	- d° -	99.53	-
86.4	- d° -	99.	-
102.	- d° -	99.9	-

On voit bien par ce tableau l'importance extrême qu'il y a à employer du cuivre chimiquement pur.

Malheureusement les fils de cuivre ainsi obtenus ne présentent qu'une faible résistance mécanique ; ce

fil s'allonge sous son propre poids et se rompt sous une charge de 28 K. par m/m².

C'est là un inconvénient sérieux dans l'établissement des lignes aériennes.

En 1881, M. Montefiore eût l'idée d'incorporer des phosphures au cuivre, et il se trouva que la résistance mécanique était considérablement augmentée sans que la conductibilité fut bien diminuée

Depuis, M. Weiller d'Angoulême a substitué le silicium au phosphore et a obtenu d'excellents résultats (97% de conductibilité et 45 K. de résistance par m/m²)

Une précieuse propriété que possède encore à un haut degré le cuivre pur c'est son extrême ductilité.

C'est ainsi qu'à l'usine de Pont de Chérny on fabrique des fils de cuivre pour passementerie d'une finesse telle que 100 kilomètres ne pèsent pas plus de 1 Kgramme. Il s'en produit environ 1000 Kg. par jour.

Le prix relativement élevé du traitement électrolytique est compensé très largement, dans la plupart des cas, par le métal précieux que l'on retire.

Chaque tonne de cuivre renferme en moyenne 1 Kg. d'argent et de 10 à 20 gr. d'or.

En 1881, la Norddeutsche-Affinerie de Hambourg recueillit 1200 kg. d'or.

En 1892 on a recueilli en France, par le traitement électrolytique des cuivres :

6000 kg. d'argent
1500 kg. d'or.

En résumé l'inconvénient que présente le traitement électrolytique du cuivre est d'immobiliser de grands capitaux à cause de l'énorme proportion de cuivre qu'il faut immobiliser dans une telle usine ; la question de force motrice devient dans ce cas une question secondaire.

Depuis quelque temps les grandes mines Américaines traitent électrolytiquement leurs minerais de cuivre au lieu d'envoyer leurs mattes en Allemagne ainsi qu'elles en avaient l'habitude. Il en est résulté un abaissement du prix sur les marchés Européens.

14e Leçon

Electro-métallurgie de l'aluminium.

Nous avons vu que les procédés électrolytiques n'étaient, à proprement parler, que des procédés d'électrométallurgie. Mais il y a loin de la conception théorique à l'application pratique d'un procédé.

Ainsi, pour qu'un corps soit électrolysable, il faut qu'il puisse être amené à l'état liquide. Or, tous les minerais naturels sont insolubles car, s'ils ne l'étaient pas, ils seraient forcément dissous et entraînés par les eaux pluviales.

Nous sommes donc déjà restreints de ce côté et il sera nécessaire de faire intervenir la fusion pour amener l'électrolyte à l'état liquide. Cette condition augmente d'une façon notable la complication de l'opération et fait que le procédé n'est applicable qu'aux métaux pour lesquels les procédés ordinaires de métallurgie sont coûteux.

Jusqu'ici la seule électro-métallurgie industrielle est celle de l'aluminium. Nous devons tout d'abord dire quelques mots des composés qui le renferment, des anciens et des nouveaux procédés d'extraction.

L'aluminium est le métal le plus répandu dans la nature. Sous forme d'alumine, il constitue la base des argiles où il existe à l'état amorphe. La bauxite est un mélange d'alumine et de sesquioxyde de fer; on en retire très facilement l'alumine. Malheureusement on est encore tributaire de l'Allemagne alors qu'en France il existe des gisements considérables, principalement dans le Gard.

L'aluminium se trouve à l'état cristallisé dans certaines pierres précieuses le corindon, le rubis (rouge)[1] le topaze (jaune) le saphir oriental (bleu) l'améthyste.

Le corindon est le minerai américain de l'aluminium.

La cryolithe (fiord d'Arksak) qui n'est autre chose qu'un fluorure double d'aluminium et de sodium se trouve en grande quantité au Groenland.

La métallurgie de l'aluminium est essentiellement française. Le premier procédé d'extraction, purement chimique, fut découvert par Ste Claire

(1) Les diffces de coloration sont dûes à la présence de divers oxydes métalliques.

Deville et mis en pratique pour la 1ère fois, dans le Laboratoire de chimie de l'École Normale supérieure en 1854.

Par le procédé Ste Claire Deville, on commence par transformer l'alumine en chlorure double d'aluminium et de sodium

Si l'on fait passer un courant de chlore sur un mélange d'alumine et de charbon on obtient un chlorure très volatil; mais si l'on mélange du sel marin, de l'alumine et du charbon on obtient un chlorure double qui est à peu près stable, facilement fusible à une température voisine de 240° et ne se volatise qu'à une température supérieure.

La préparation de l'aluminium exige l'em-ploi du sodium qui est un métal d'un prix encore très élevé actuellement, ce qui explique le prix élevé de l'aluminium obtenu par les pro-cédés chimiques.

En 1854, alors que le prix du sodium était lui-même de 3000f le Kilogr. l'aluminium va-lait 2000f tandis que, 3 ans plus tard, l'a-baissement du prix du sodium entraînait celui du prix de l'aluminium à 200f environ. Aujourd'hui, grâce aux procédés électrolytiques

le prix moyen est de dix francs (10 fr.).

L'aluminium est un métal blanc comme l'argent aussi inoxydable que lui; il est très sonore, malléable et ductile.

Il est très inaltérable à l'air et résiste à la plupart des acides. L'acide azotique, faible ou concentré n'agit pas sur lui à froid, l'acide sulfurique non plus mais l'acide chlorydrique l'attaque très facilement.

L'acide acétique, surtout s'il est mélangé au sel marin, l'attaque aussi. Cette circonstance le rend peu propre aux usages domestiques.

Les dissolutions alcalines, l'ammoniaque constituent les plus grands ennemis de l'aluminium. C'est pourquoi on ne doit jamais laver au savon les objets en aluminium.

Son point de fusion est intermédiaire entre celui du zinc et de l'argent.

Vers 550°, il peut se marteler et entre en fusion vers 600° sans qu'il y ait à craindre son oxydation.

C'est le plus léger des métaux : sa densité est d'environ 2.56 c'est-à-dire celle du verre. En raison de sa légèreté et de son inaltérabilité, on peut dire que l'aluminium est appelé à un grand avenir industriel. Un objet de volume déterminé pesant 1 Kg. en aluminium pèserait 7 k. 159 en or.

4.k08 en argent

3.k43 en cuivre

2.k85 en étain

2.k68 en zinc

Il présente une résistance mécanique assez grande. L'aluminium coulé résiste en effet à une tension de 10 Kg. par m/m² et peut atteindre par l'étirage une résistance double ; la résistance du fer dans les mêmes conditions est de 60 Kg. celle du laiton 36 Kg. celle de l'acier 75.

Un des inconvénients que l'on rencontre dans l'emploi de l'aluminium consiste dans la difficulté que l'on rencontre lorsqu'on veut le souder.

Divers alliages ont été préconisés, celui d'aluminium et de zinc peut-être employé. Cette difficulté de souder l'aluminium provient de la couche d'oxyde qui se forme à sa surface dès qu'on le chauffe et qui empêche la soudure de prendre.

Malgré cet inconvénient l'aluminium est employé aujourd'hui à la confection d'une foule d'objets, particulièrement ceux estampés ; il pourra se répandre pour la confection de certains objets d'équipements tels que gamelle, etc...,

Mais où l'aluminium semble devoir jouer un rôle important dans l'avenir, c'est comme conducteur

électrique. Il est en effet très bon conducteur (conductibilité 51/100 par rapport à celle du cuivre).

A ce point de vue nous traiterons la question suivante :

A quel prix devrait descendre le Kilog. d'aluminium pour pouvoir rivaliser avec le cuivre comme conducteur électrique ?

Voici d'abord les résistances de fils de divers métaux de 1 m/m² de section et 1 m de longueur.

Argent :	0.01987
Cuivre :	0.02056
Or :	0.02650
Aluminium :	0.03751
Fer :	0,12510

Comparons l'aluminium et le cuivre :

La formule $R = \frac{al}{s}$ peut s'écrire $\frac{al^2}{sl}$ ou $\frac{dal^2}{dsl}$ (d étant la densité on peut remplacer le produit dsl par le poids P) remplaçons de même le produit da par un coefficient K on trouve :

$$R = \frac{Kl^2}{P}$$

Pour le cuivre, il vient :

$$R = \frac{142\,l^2}{P}$$

Pour l'aluminium :

$$R = \frac{74\,l^2}{P}$$

P étant exprimé en kilogr. et l en kilomètres.

Soit à construire deux lignes de même longueur et de même résistance, l'une en cuivre, l'autre en aluminium. Si nous appelons P le poids de la 1ère et P' le poids de la seconde, on aura l'égalité :

$$\frac{142\, l^2}{P} = \frac{74\, l^2}{P'}$$

d'où

$$P' = \frac{74}{142} P$$

soit approximativement :

$$P' = \frac{P}{2}$$

Ainsi, à résistance et à longueur égales le poids de la ligne en aluminium est environ 2 fois plus faible que celui du cuivre.

Les poteaux seraient donc moins chargés et l'on pourrait augmenter leur écartement (1)

Soit maintenant 2f. le prix du kilogr. de cuivre le prix de la ligne sera :

$$2P$$

Si x est le prix du kilogr. d'aluminium on aura l'égalité :

$$xP' = 2P$$

$$x\frac{P}{2} = 2P$$

d'où $x = 4$

(1) Toutes réserves étant faites cependant sur la résistance mécanique de l'aluminium

Ainsi lorsque l'aluminium coûtera 4f. le kilogr. il sera indifférent, au point de vue de la dépense et pour une même résistance de la construire en cuivre ou en aluminium.

Mais il y a une objection à faire au point de vue de la résistance à la rupture; il est vrai que ce défaut est en partie compensé par la légèreté de la ligne.

En tous cas, il serait possible en l'alliant à d'autres métaux de lui donner la résistance mécanique nécessaire.

L'aluminium est très employé depuis quelques années dans la métallurgie c'est ainsi qu'on l'emploie à l'affinage de l'acier (convertisseur Bessemer) à cause de son extrême facilité à s'oxyder aux températures élevées. L'aluminium présente encore l'avantage de rendre la masse plus fluide que par l'emploi du silicium ou du manganèse ainsi qu'on le faisait auparavant. De plus l'opération se fait plus tranquillement et à la coulée il se présente moins de soufflures. L'aluminium donne également cette propriété à la fonte.

A l'état d'alliage, l'aluminium est

également très employé (bronze d'aluminium découvert par Debray, le collaborateur de Ste Claire Deville). A 10% d'aluminium le bronze acquiert une propriété de tenacité et de dureté qui le fait rechercher en mé-canique pour les coussinets et toutes les pièces à frottement.

Enfin il rend le fer plus fusible et donne ce qu'on appelle le fer mitis.

Le ferro-aluminium commence également à être employé dans la construction mécanique.

Procédés électro-métallurgiques.

Procédé Cowles. — C'est le premier en date; il remonte à 1885 et a reçu une application à Cleveland. C'est un procédé électrique mais non électrolytique, car c'est la chaleur électrique qui est utilisée.

L'opération se fait dans un four spécial en briques réfractaires muni intérieurement d'un revêtement de 10 %m. de charbon (houille pulvérisée lavée à l'eau de chaux et séchée). On ne prépare pas l'aluminium pur mais un alliage. (bronze d'aluminium ou ferro-aluminium)

Les matières à allier sont placées entre deux électrodes de charbon de 0.75 de long et 75 m/m de côté. On fait varier leur écartement de façon à maintenir une intensité constante 3 à 4000 ampères sous 80 volts. Dans cette opération, la température énorme qui se produit dissocie l'alumine ; l'oxygène qui s'en dégage est empêché par le charbon de se recombiner avec le métal.

En 1 heure 1/2 on obtient 90 kg. d'alliage à 14% ou 8k.4 d'aluminium pour 25500 watt-heures.

1k.	- d°. -	30 kilowatts
1k	- d°. -	46 chevaux-heures.

Dans les procédés électrolytiques, l'opération consiste à faire passer un courant dans un composé amené à l'état de fusion.

<u>Procédé</u> <u>Héroult</u>. _ Ce procédé présente une certaine analogie avec le procédé Cowles.

Il consiste à placer au fond d'un creuset en charbon conducteur, fretté et consolidé extérieurement, du cuivre en morceaux que l'on fond. On ajoute ensuite l'alumine qui fond à son tour et se décompose en oxygène qui se porte au pôle + et brûle les plaques de charbon plongeant dans le bain

et servent de prises de courant. L'aluminium se porte au pole − et s'allie au cuivre pour donner du bronze d'aluminium.

On fond deux fois par 24 heures et l'on obtient 3000 Kg. de bronze à 10%.

A Lauffen le courant est fourni par 2 dynamos Brown de 6000 ampères et 20 volts.

La production de 1 Kg. d'aluminium exige 29 chev. heures, chiffre notablement inférieur à celui du procédé Cowles

---

Usine de Froges (Isère) — Cette usine a été créée en 1889, en vue de l'application du procédé Héroult à la fabrication du bronze d'aluminium et du ferro-aluminium. Des modifications ont été apportées

l'année suivante, au procédé Héroult, en vue d'obtenir l'aluminium pur (1).

Le traitement s'opère dans le four représenté ci-dessous :

R
P
t
t
A
+
C
N̄
B

A est une cuve en tôle de 60 c/m. de diamètre et de 55 de hauteur. Au fond est l'électrode négative N en cuivre plongeant dans une cuve en fonte B dans laquelle est une certaine quantité de mercure destiné à assurer un bon contact ; autour de cette cuve en fonte circule de l'eau pour empêcher l'échauffement et la volatilisation du mercure. Au fond de la cuve C on dispose une couche de charbon graphitique mêlé de goudron. En P est le charbon +

(1) - Ces modifications font l'objet du brevet de M. Kiliani.

formé de lames de charbon aggloméré et réunies en un bloc ; au sommet est une chape R recevant les conducteurs venant de la dynamo. Autour de la cuve est un tube t percé de petits trous et recevant de l'eau destinée à l'arrosage de la cuve en tôle dans le cas où elle viendrait à rougir.

Les électrodes en charbon sont fabriquées à l'usine de Champ en aval de celle de Froges. Les machines destinées à cette fabrication sont mues par une turbine alimentée par l'eau du canal de fuite de l'usine supérieure.

La fabrication de ce charbon est très soignée et comporte un certain nombre d'opérations. La matière employée est le coke de cornues à gaz. On obtient d'abord des prismes de 0m.15 d'épaisseur, 0.25 de larg.r et 1m de longueur.

Ces prismes après un séchage de 2 ou 3 jours à l'air libre et de 4 jours dans une étuve à 150° sont réunis en un bloc de section carrée par un procédé tenu secret. Les blocs ainsi obtenus sont encore séchés à l'étuve pendant 4 ou 5 jours et sciés en 2 parties de 0.50 de longueur.

Marche de l'opération — Le charbon étant fixé à la chape servant à amener le courant est

abaissé vers le fond de la cuve en ayant soin d'in-terposer un charbon plat pour permettre au cou-rant de passer. On verse ensuite de la cryolithe naturelle par petites quantités puis on ajoute l'alu-mine qui est le véritable minerai d'aluminium.

Pendant l'opération, les parois de la cuve se recouvrent d'une couche protectrice de cryolithe ré-sultant probablement du refroidissement des parois pendant les débuts de l'opération.

La cryolithe se solidifie aussi à la surface du bain et l'on est obligé de crever la croûte à coups de ringard. Toutes les 24 heures on débouche le trou de coulée et l'on obtient environ 22 gr. d'aluminium pur par cheval-heure.

Théorie de l'opération. — Il semble que dans ce procédé, il y a une véritable électrolyse de l'alumine, électrolyse favorisée il est vrai par la présence du charbon positif qui s'unit à l'oxygène de l'alumine. La température relativement faible à laquelle on opère ne permet pas de dire, comme dans les procédés Cowles ou Héroult, que c'est la température très élevée produite par l'arc voltaïque qui dissocie l'alumine.

Le charbon seul ne peut d'ailleurs réduire l'alumine.

On est donc conduit à admettre que l'alumine fondue avec la cryolithe est-elle même électrolysée et que la combustion du charbon vient en aide à l'électrolyse pour opérer la réduction.

Par Kilogr. d'aluminium on consomme:

1k.600 de charbon.

2k.150 d'alumine.

1.800 de cryolithe.

L'alumine est achetée en Allemagne et vaut 1f.40 le Kilogr. la cryolithe coûte 1f.20 au minimum.

Cette usine dont la production était de 200 Kos par 24 heures, au mois de juillet dernier, occupe 28 ouvriers.

La même société a monté du côté de Modane une usine assurant une production de 1000 Kg. par jour et pouvant être portée à 10.000 Kg.

Procédé Minet. — Ce procédé est purement électrolytique. Les creusets sont chauffés au préalable dans des fours spéciaux et soumis ensuite à l'électrolyse. Le bain soumis au courant est formé d'un mélange de 25 à 40% de fluorure double (cryolithe) et 75 à 60% de chlorure de sodium. Pendant l'opération, la température, la fluidité du bain et sa composition sont maintenues constantes. Le

fluorure d'aluminium est l'électrolyte principal décomposé sous une tension de 4 à 5 volts. Le fluor se porte au pôle + et l'aluminium au pôle −. On alimente pour maintenir la composition constante par du fluorure d'aluminium au fur et à mesure de la décomposition de ce sel.

Le chlorure de sodium permet de donner au bain le degré de liquidité convenable pour l'électrolyse. On prélève de temps à autre des échantillons qu'on soumet à l'analyse.

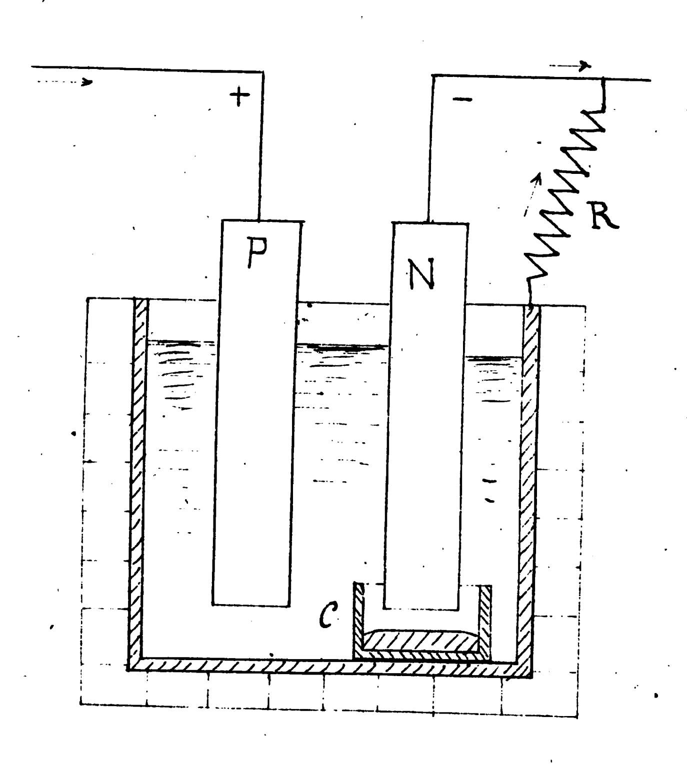
Si l'on ne prenait pas de précautions la cuve en fonte serait rapidement attaquée car rien ne résiste à la propriété corrosive des fluorures fondus. Cette attaque serait d'ailleurs très nuisible à la marche de l'opération ; en effet le bain s'enrichirait du fluorure du métal de la cuve et c'est ce métal qui serait déposé à la place de l'aluminium.

Pour prolonger sa durée, M. Minet a eu l'idée suivante qui est très ingénieuse : Entre l'électrode de sortie de la cuve on intercale une résistance R réglée de telle façon que les $\frac{5}{100}$ seulement du courant traversent la cuve. Le creuset de fonte joue dans ce cas le rôle d'électrode négative dérivée, et se recouvre d'une mince couche d'aluminium

qui se dépose et assure sa conservation.

C'est là le point le plus original de la méthode de M. Minet.

La fig. ci-dessous montre la disposition du creuset.



P électrode + N électrode − ; cette dernière est en charbon ou en métal selon qu'on désire obtenir du métal pur ou du métal destiné à entrer dans la formation d'un alliage, C creuset recevant l'aluminium fondu au fur et à mesure de sa production. La cuve métallique est entourée d'une garniture de maçonnerie.

= La production est d'environ 30 gr. d'aluminium

par cheval-heure.

Pour obtenir 1 k. d'aluminium il faut 3 kg. de fluorure, mais une addition de bauxite permet de régénérer le bain et permet de réduire de moitié la dépense de fluorure.

Une usine de ce genre est établie à Creil, l'alumine est achetée dans l'Oise au prix de 47f. les 100 k.os et contient de 50 à 60 % d'aluminium.

En modifiant certaines dispositions de détails on obtient soit du métal pur soit du métal destiné aux alliages.

L'usine fabrique elle-même son fluorure d'aluminium et de sodium.

(Procédé Minet (1888))

Densité du courant au pôle positif	0.75 ampères par cm²
- d° - négatif	0.5 - d° -
Température θ	920 degrés centigrade
Durée de l'expérience t	22 heures.
Intensité du courant I	1500 ampères
Quantité d'électricité It	33000 ampères-heure
Masse d'aluminium théorique 0.34 It	11220 grammes.
- obtenue pratiquement	6500 -
Rendement	58 pour cent
Force électromotrice minima E	2 volts
Résistance de l'Electrolyte r	1700 microhms

Diffce de potentiel aux électrodes $e = E + rI$ ... 4.55 volts.

Puissance électrique fournie P .... 6.825 Kilowatts.

Energie totale dépensée pendant l'opération $W = Pt$ } ... 150 Kilowatts-heure

Masse du métal produite par Kilowatt-heure .... 43.3 grammes.

Quantité d'énergie dépensée dans l'électrolyte pour produire 1 Kg. d'aluminium .... } 23.1 Kilowatts-heures.

Ce procédé est également employé à St Michel (Savoie)

Il existe d'autres procédés d'extraction de l'aluminium, mais ceux que nous venons d'étudier sont appliqués en France.

M. C. Faure de Grenoble a eu l'idée d'un nouveau traitement, qui n'a pas, il est vrai, répondu à ses espérances mais qui n'en est pas moins très inté-ressant.

L'idée de M. Faure était de revenir à l'ancienne méthode par l'emploi du chlorure double d'alu-minium et de sodium. Actuellement ce chlorure est produit par l'action du chlore sur un mélange d'alumine et de charbon. Or, le chlore, qui se pro-duit par l'action de l'acide chlorydrique sur le bioxyde de manganèse est coûteux à produire. M. Faure voulait employer l'acide chlorydrique en faisant passer des vapeurs de cet acide sur un

mélange d'alumine et de charbon. On devait obtenir ainsi un produit réellement économique.

Mais on doit opérer à haute température et dans ces conditions il y a une action destructive à laquelle les fours ne résistent pas.

Dans l'électrolyse du chlorure, l'aluminium se dépose au pôle négatif et le chlore se dégage.

On devait l'absorber en le faisant passer sur de la chaux et l'on obtenait ainsi 12 kg. de chlorure de chaux par kilogr. d'aluminium produit.

Le chlorure de chaux étant un produit marchand on pouvait facilement en tirer profit. C'était là le côté économique de la méthode à l'aide de laquelle M. Faure pensait obtenir l'aluminium au prix de 0.^{f}35 centimes le kilogramme.

15e Leçon

Applications diverses de l'action du courant sur les chlorures alcalins : Blanchiment, fabrication des chlorates des carbonates, du chlore, des alcalis, etc...,

Nous étudierons dans cette leçon l'application de l'électrolyse à la préparation de certains composés très employés dans l'industrie.

L'électrolyse des chlorures est remarquable à ce point de vue.

Prenons par exemple du chlorure de sodium dont la formule est :

$$NaCl = 58,5$$

Le Sodium $Na = 23$ est un métal dont nous avons déjà parlé à propos du traitement de l'aluminium ; c'est grâce aux travaux de Ste Claire Deville qu'on peut, aujourd'hui, l'obtenir économiquement.

Le sodium s'oxyde très rapidement à l'air

aussi doit-on le conserver dans de l'huile de naphte ou tout autre carbure d'hydrogène liquide.

Si l'on jette un fragment de ce métal dans l'eau on observe une vive effervescence dûe au dégagement d'hydrogène résultant de la décomposition de l'eau.

Le chlore ($Cl = 35.5$) est un gaz jaune verdâtre jouissant de propriétés décolorantes particulières.

Faisons traverser une dissolution de chlorure de sodium (sel marin) par un courant. Ce composé binaire est aussitôt décomposé en ses éléments, le sodium se porte à l'électrode de sortie et le chlore à l'électrode d'entrée.

Toutefois les choses ne se passent pas aussi sim--plement.

Le sodium ne se dépose pas à l'état métallique car il est très oxydable, ainsi que nous l'avons dit.

Il décompose l'eau et donne de la soude caus--tique. D'autre part, le chlore, gaz soluble dans l'eau, ne se dégage pas et reste en dissolution. On a donc au sein du liquide, de la soude et du chlore qui viennent réagir l'un sur l'autre en donnant un mélange d'hypochlorate de soude et de chlorure de sodium. Ce mélange, résultat brut de l'action du chlore sur la soude, porte le nom

assez impropre de chlorure de soude : il est tout à fait analogue à l'eau de javelle (chlorure de potasse) et joint des mêmes propriétés décolorantes.

D'autres sels semblables, tels que le chlorure de potassium, pourraient également être employés.

Tel est le principe du blanchiment de la pâte à papier connu sous le nom de procédé Hermite.

Il est actuellement pratiqué dans un grand nombre d'usines, parmi lesquelles il convient de citer la papeterie de Lancey (près Grenoble). M. Corbin, Dir.r de cette usine, a apporté de notables perfectionnements à cette méthode qui donne aujourd'hui d'excellents résultats.

Le liquide dans le procédé Hermite, est un mélange de sel marin et de chlorure de magnésium (1) Par la décomposition il se forme au pôle + (anode) des composés décolorants (hypochlorite). Après décoloration le chlorure de sodium régénéré repasse dans les électrolyseurs afin de réduire la dépense au minimum.

Les anodes étaient primitivement formées de toiles de platine qui devaient être assez rapidement

(1) - L'utilité du chlorure de magnésium qui complique les opérations est contestable.

renouvelées; aujourd'hui M. Corbin leur a substitué des lames de platine de 1/10e de millimètre d'épaisseur. Les cathodes, dans l'appareil Hermite, sont formées de disques en zinc animés d'un mouvement de rota-tion afin d'éviter les dépôts.

L'électrolyte était autrefois, à l'usine de Lancey, composé dans la proportion de 1 kilogr. de chlorure de magnésium pour 10 kg. de chlorure de sodium. Aujourd'hui on emploie uniquement le sel marin (1)

La différence essentielle entre les anciens procé-dés et ceux employés actuellement consiste surtout en ce que par les premiers la matière décolorante (chlorure de chaux) est perdue tandis que dans les procédés actuels, le liquide décolorant est régénéré et sert pour ainsi dire indéfiniment.

Le blanchiment de la pâte à papier n'est pas la seule application de ce procédé : on peut en effet l'employer au blanchiment de la cire, des fécules, etc..., à l'épuration des eaux d'égout, à la désin-fection des villes, des bateaux, etc..., Dans ce der-nier cas et dans celui des ports maritimes, on prend simplement l'eau de mer comme liquide

(1). Pour plus de détails nous renvoyons au cours de 2e année où la méthode pratiquée à l'Usine de Lancey est exposée avec quelques détails.

soumis à l'électrolyse, ce qui simplifie notablement les opérations.

Séparation électrolytique du chlore et de la soude.

Procédé Greenwood — Ce procédé est employé à Londres par la Compagnie du Phénix.

Dans l'électrolyse du sel marin, si l'on empêche le chlore et la soude de se combiner, on obtiendra d'un côté du chlore qui pourra être employé à la fabrication des chlorures de chaux par exemple et de l'autre de la soude caustique qui peut être utilisée directement ou transformée en carbonate de soude.

Pour arriver à ce résultat on peut employer un vase électrolyseur séparé en deux compartiments par une cloison poreuse. Le carbonate de soude s'obtiendra à l'aide d'un courant d'acide carbonique qui déterminera un précipité de carbonate.

On a là un procédé remarquablement simple de fabrication de soude caustique, de carbonate de soude ou de chlorure de chaux.

C'est ce procédé qui est connu sous le nom de Procédé Greenwood et qui commence à être appliqué en Angleterre.

La grande difficulté consiste à trouver des substances inattaquables. On a employé le platine, le charbon, mais au bout de quelques temps ces électrodes étaient attaquées.

On emploie aujourd'hui des électrodes formées d'une âme métallique rendue imperméable et inattaquable par le chlore.

Les cloisons poreuses sont formées de pièces d'ar-doises superposées et rendues perméables par de l'amiante.

On emploie 5 grands vases contenant 5 anodes et 6 cathodes. Le chlore est dirigé dans un lait de chaux.

On emploie une f. e. m. de 4,4 volts par élément avec une densité de 1 ampère par décim. carré.

La solution employée est une dissolution à 16 % de sel marin.

Les résultats ont montré qu'il fallait :

2660 watt-heure pour décomposer 1 kilogr. de sel marin alors que la théorie donne 1995 watt-heure.

Le rendement est donc de 75 %

En estimant le prix du kilowatt-heure à 3.50 centimes et 83fr. la tonne de sel-marin, le prix de la soude et du chlore seraient le 1/3 des prix actuels.

Remarquons que pour les grandes usines ce

prix de 3,5 centimes le Kilowatt-heure n'est pas exagéré.

Par conséquent le produit de 7 tonnes de soude et de 1 tonne et demie de chlorure de chaux serait de 150 francs.

L'électrolyse des chlorures peut encore donner des chlorates : si, au lieu d'employer des dissolutions étendues et froides, on emploie des dissolutions concentrées et chaudes, l'hypochlorite ne peut en effet se former et se transforme en chlorate.

Ces principes sont surtout appliqués dans le cas du chlorate de potasse qui, très peu soluble à froid, présente le grand avantage de se précipiter par refroidissement. Le chlorate de soude, qui se forme d'ailleurs de la même manière, serait plus difficile à séparer de la liqueur parce qu'il est soluble à froid.

Ce procédé est d'une extrême simplicité, si on le compare aux procédés purement chimiques ; il commence à être appliqué à l'usine de Vallorbes (Suisse) depuis 1890 ; d'autres sont en activité ou en voie de formation.

L'usine de Vallorbes comprend 270 cuves ; les anodes sont en platine, extrêmement minces, les cathodes en fer.

On emploie une solution à 25 % de chlorure de potassium et l'on maintient la température de 45 à 55° par l'action du courant. On alimente avec du chlorure de potassium. Pour éviter l'action réductrice de l'hydrogène sur le chlorate formé, la cuve est séparée en deux compartiments par une cloison poreuse (1).

Il se dégage environ 100 m. cubes d'hydrogène par tonne de chlorate ; il entraîne du chlorure de potassium qui se dépose sur les toits sous forme de poudre blanchâtre donnant ainsi un aspect de moulin à ces Usines. Cet entraînement oblige à éloigner les bâtiments des machines

Des traces excessivement faibles d'oxyde de cuivre suffisent pour diminuer fortement et même pour annuler le rendement ; ces traces empêchent les hy-pochlorites de se former.

Le courant est fourni par 10 dynamos Thury de 160 chevaux chacune alimentant 10 bains par montage à 3 fils ; les dynamos sont directement accouplées aux machines.

Actuellement deux autres dynamos Thury de 700 chevaux fonctionnent comme celles de Solève

(1). D'après quelques essais récents et couronnés de succès, cette cloison poreuse ne semble pas indispensable.

La force motrice est hydraulique, débit de 2.5 mètres cubes par seconde sous une chute de 70 mètres et l'Usine électrique est complètement séparée de l'Usine chimique.

Cette fabrication a pris une certaine importance ces dernières années ; la production s'est élevée en 1891 à 8000 tonnes pour toute l'Europe dont 5000 pour le Chemical-Union (Syndicat des fabricants anglais). Vallorbes n'a produit que 400 tonnes sur ce nombre.

Par les procédés chimiques on emploie comme matière première du bioxyde de manganèse, de l'acide chlorydrique, de la chaux et du chlorure de sodium et 25 Kg. de charbon pour chauffage par kilogramme de chlorate obtenu.

Par le procédé électrique, il faut pour la même quantité de chlorate une puissance de 20 chevaux-heure. Il n'y a donc pas d'avantage au point de vue de la dépense si l'on doit employer une force motrice à vapeur. Mais l'avantage est évident si l'on emploie, comme c'est le cas, une force motrice hydraulique.

Table des Matières

1ère Leçon (pages 1 à 28)

2e Leçon (pages 28 à 56)

3e Leçon (pages 56 à 96)

15e Leçon (pages 412 à 420)

— Applications diverses de l'action du courant sur les chlorures alcalins : Blanchiment, Fabrication des chlorates, des carbonates, du chlore, des alcalis, etc..., Procédé Greenwood —



